

FISICA

DESCRIPTIVA

HARVEY E. WHITE

Profesor de Fisica y

Director del Lawrence Hall of Cience de la

Universidad de California



REVERTE EDICIONES, S.A. DE C.V.

Física

Descriptiva

PREFACIO A LA SEGUNDA EDICION

Se han reemplazado tres de los cuarenta capítulos de la primera edición por otros nuevos: Movimiento Planetario y Satélites; Difracción, Interferencia y Polarización; y Relatividad. Se ha agregado color a la mayoría de las figuras; para acentuar sus detalles importantes, se ha adoptado un formato de dos columnas por página y se han agregado problemas nuevos al final de cada capítulo.

El autor ha tratado de ponerse al día en todos los temas en que se han logrado descubrimientos recientes y en investigación científica y desarrollos técnicos. Se han agregado nuevas secciones; por ejemplo, en cohetes y vuelo espacial, velocidades orbitales y de escape, campos gravitacionales, física de alta energía, partículas elementales y paridad. Deseo aprovechar esta oportunidad para agradecer a mi esposa por la lectura de pruebas y galeras y a la señora Polly Thomas por mecanografiar todo el material nuevo.

HARVEY E. WHITE.

*Berkeley, California.
Enero, 1963.*

Título de la obra en inglés:
DESCRIPTIVE COLLEGE PHYSICS
publicada por:
Van Nostrand Company, Inc.
traducción al español
Ing. Armando Rodríguez N.

2ª Edición
11ª Reimpresión

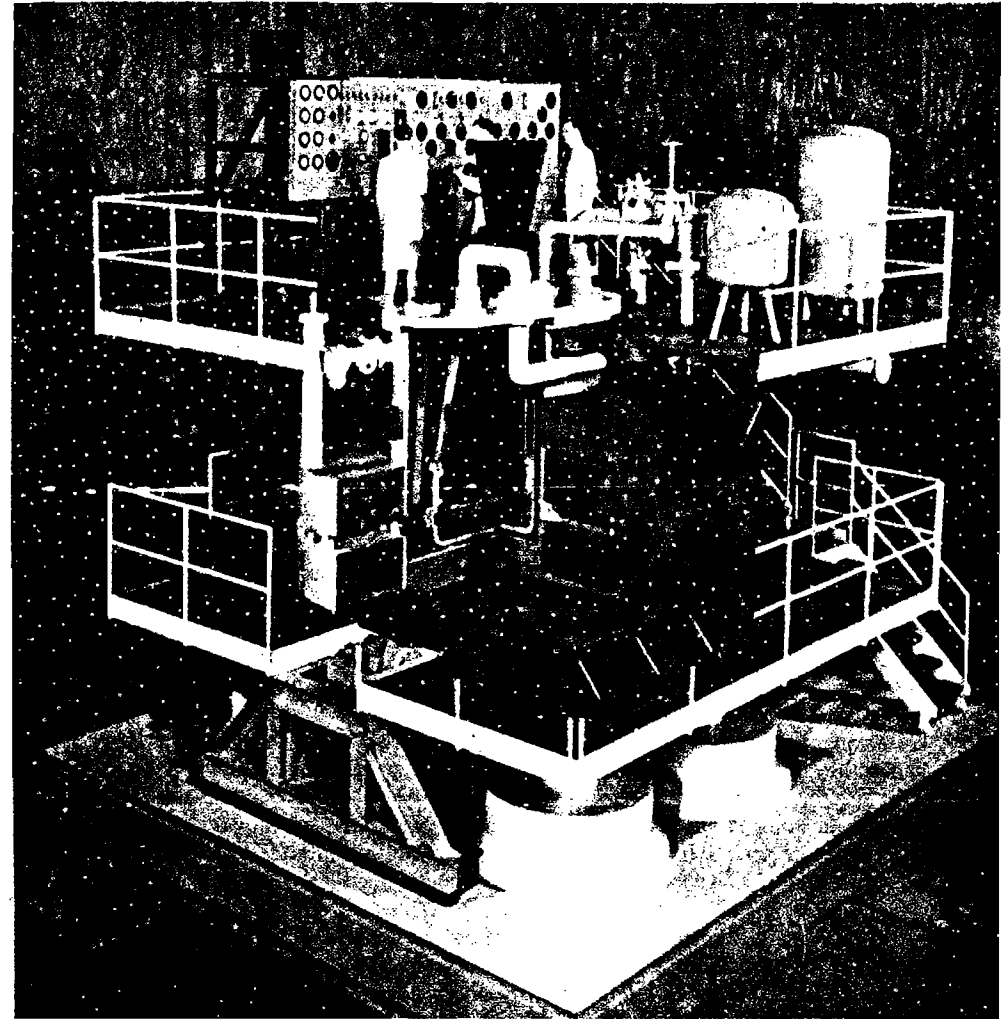
© 1990, D. Van Nostrand Company, Inc.
120 Alexander St. Princeton, New Jersey

Derechos reservados en lengua española

© 1997, Reverté Ediciones, S.A. de C.V.
Río Pánuco 141 Col. Cuauhtémoc
C.P. 06500 México, D.F.
Tel.: 533-56-58 al 60 Fax: 514-67-99

ISBN 968-6708-05-7

Impreso en México Printed in Mexico



Modelo a escala de la cámara de burbujas de Hidrógeno líquido, para el estudio de los eventos nucleares producidos por los haces de alta energía de partículas atómicas procedentes del Bevatrón de 6.2 Bv. Véanse en la sección cortada, al centro de la figura, los devanados del campo magnético y la trayectoria simulada de burbujas en la cámara. Ver también figuras 40M y 40N. (Cortesía de L. W. Alvarez y Socios del Laboratorio de Radiación de la Universidad de California).

PREFACIO A LA PRIMERA EDICION

Este texto se ha derivado de otro mayor, "Física Clásica y Moderna", escrito por el autor como texto para estudiantes de la Escuela de Ciencias y Letras de la Universidad de California. Aunque aquel texto fue escrito originalmente para un curso de Física de un semestre, los profesores de Física de muchas universidades en los Estados Unidos de Norteamérica y otros países, lo han estado usando para sus cursos normales de un año. Estos profesores tomaron el libro como texto, principalmente por el gran espacio dedicado a la Física Atómica. Lo tomaron reconociendo que el tratado de la Física Clásica era demasiado breve y que tenían que agregar material suplementario para completarlo. Para satisfacer esta necesidad, el autor elevó el nivel de tratamiento matemático, incluyendo Trigonometría, amplió la sección de Física Atómica Moderna y publicó el libro con un nuevo título, "Física Moderna".

Ya que muchas universidades siguen ofreciendo cursos de un semestre de Física del tipo descriptivo, además de su curso normal de un año, pareció recomendable revisar la "Física Clásica y Moderna", para satisfacer estas necesidades y publicarlo con el nuevo título de "Física Descriptiva". Debido a que la primera edición incluía más material del que se podía estudiar convenientemente en un semestre, esta revisión, entre otras cosas, ha traído una reducción del material expuesto. Se ha hecho un esfuerzo especial para mantener el mismo estilo de tratamiento y las preguntas y problemas, todos nuevos, se han incluido al final de los capítulos.

El curso de un semestre de Física que actualmente da el autor en la Universidad de California, es una presentación no matemática para los estudiantes de carreras que no llevan ninguna ciencia física o biológica. Aunque en las clases se dan algunas ecuaciones algebraicas sencillas para ilustrar los principios y leyes estudiadas, y el profesor resuelve frecuentes problemas numéricos, no se exige a los estudiantes que ellos mismos resuelvan los problemas. En las clases se incluyen numerosas demostraciones experimentales, planeadas cuidadosamente, y se examina con frecuencia a los estudiantes mediante preguntas del tipo incluido al final de cada capítulo.

El autor ha encontrado, en veinte años de enseñanza, que un curso en que el estudiante no se ve obligado a resolver problemas, atrae aproximadamente el triple del número de estudiantes que, en otro caso, se inscribirían en la clase. Creyendo que es mejor una exposición, aunque sea superficial, de la Física Clásica y Moderna a los estudiantes de carreras no científicas que la absoluta ignorancia de este tema, el autor ha adoptado esta presentación no matemática y encuentra que puede lograrse ampliamente el interés de los estudiantes por la ejecución de numerosas demostraciones en clase.

La razón por la que se incluyen problemas al final de los capítulos, es doble: primero, porque muchos estudiantes toman suficiente interés por la Física.

sica para ir más allá del trabajo requerido de ellos y resuelven los problemas; y segundo, porque algunos profesores de Física prefieren incluir ejemplos numéricos en las tareas y exámenes. Se da respuesta a algunos problemas, para animar a aquellos estudiantes aficionados a las Ciencias Físicas.

El autor quiere aprovechar esta oportunidad para agradecer al doctor Herschel Snodgrass sus consejos y críticas acerca de ciertos capítulos, y también agradecer a muchos profesores y estudiantes de Física que le han escrito incluyendo correcciones y sugerencias, a la vez que animándolo.

H. E. W.

CONTENIDO

PREFACIO	IX
INTRODUCCIÓN - ILUSIONES ÓPTICAS	1

MECANICA

1. UNIDADES DE MEDICIÓN	10
2. RAPIDEZ, VELOCIDAD Y ACELERACIÓN	16
3. LEYES DEL MOVIMIENTO DE NEWTON	23
4. CAÍDA DE CUERPOS, PROYECTILES Y LEY DE LA GRAVITACIÓN DE NEWTON	30
5. FUERZAS, VECTORES Y CENTRO DE GRAVEDAD	39
6. TRABAJO, ENERGÍA Y POTENCIA	49
7. CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA Y DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO	56
8. MOVIMIENTO CIRCULAR	64
9. MOVIMIENTO PLANETARIO Y SATÉLITES	72

PROPIEDADES DE LA MATERIA

10. TEORÍA ATÓMICA DE LA MATERIA	83
11. PROPIEDADES DE LOS SÓLIDOS	92
12. PROPIEDADES DE LOS LÍQUIDOS	99
13. PROPIEDADES DE LOS GASES	109
14. FLUIDOS EN MOVIMIENTO	119

CALOR

15. TEMPERATURA Y EXPANSIÓN	128
16. CAPACIDAD TÉRMICA Y TRANSMISIÓN DEL CALOR	138
17. CAMBIOS DE ESTADO Y BAJAS TEMPERATURAS	148

ACUSTICA

18. VIBRACIONES Y ONDAS	159
19. SONIDO	167
20. INSTRUMENTOS MUSICALES	179

LUZ

21. REFLEXIÓN, REFRACCIÓN Y DISPERSIÓN DE LA LUZ	190
22. LA CIENCIA DEL COLOR	201
23. LENTES E INSTRUMENTOS ÓPTICOS	207
24. DIFRACCIÓN, INTERFERENCIA Y POLARIZACIÓN	217
25. RELATIVIDAD	229

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

26. ELECTRICIDAD EN REPOSO	237
27. ELECTRICIDAD EN MOVIMIENTO	247
28. MAGNETISMO	260
29. EFECTO DE CORRIENTE ELÉCTRICA	269

FISICA ATOMICA

30. EL DESCUBRIMIENTO DEL ELECTRÓN	281
31. EL DESCUBRIMIENTO DEL ÁTOMO	289
32. ESPECTROS ATÓMICOS Y ESTRUCTURA ATÓMICA	298
33. RAYOS X Y EL EFECTO FOTOELÉCTRICO	312

FISICA NUCLEAR

34. RADIATIVIDAD	324
35. COLISIONES ATÓMICAS Y DESINTEGRACIONES NUCLEARES	333
36. RAYOS CÓSMICOS	343
37. ACELERADORES ATÓMICOS	354
38. TRANSMUTACIÓN DE LOS ELEMENTOS	364
39. EL NÚCLEO DEL ÁTOMO Y LA FISIÓN	375
40. ENERGÍA NUCLEAR Y PARTÍCULAS ELEMENTALES	389

APÉNDICES	405
---------------------	-----

ÍNDICE ALFABÉTICO	426
-----------------------------	-----

INTRODUCCION ILUSIONES
OPTICAS

La Física es una ciencia natural que históricamente no tiene principio ni fin. Siendo una ciencia, es un proceso continuo por el cual, al pasar los años, el hombre aprende cada vez más acerca de los detalles, aparentemente innumerables, del mundo que lo rodea.

Al tratar de establecer el origen de las ciencias básicas, muchos historiadores retroceden más de 2 000 años, a la era de los grandes filósofos Aristóteles, Copérnico, Arquímedes, Hipócrates, etc. Admiramos a estos hombres porque en su tiempo tuvieron un profundo sentido del razonamiento, y aplicaron su talento a la observación y explicación de muchos fenómenos naturales. Aunque muchos de los conceptos que formularon demuestran una notable penetración de su parte, el progreso fue relativamente lento, porque despreciaron un factor muy importante: no lograron comprender la importancia de la experimentación. Aquí está el secreto del rápido progreso de la ciencia en nuestro siglo xx.

Para lograr adelantos científicos, ya sea en Ciencias Biológicas o Físicas, deben efectuarse experimentos bien planeados, deben hacerse observaciones y se deben tomar y registrar medidas. Mediante el estudio de estas mediciones registradas, su correlación y formulación matemática, es como se establecen, se verifican y se extienden las leyes de la Naturaleza para que abarquen otros fenómenos naturales. *La Física se puede definir, por lo tanto, como la rama del conocimiento y la experimentación que se ocupa del mundo inanimado y sus fenómenos.*

1 La Física como método objetivo. Se sabe desde hace mucho que, para hacer observaciones precisas, no se puede confiar en los sentidos humanos del tacto, la vista, el

oído, etc. Los métodos de medición que confían completamente en los sentidos, son llamados *métodos subjetivos*. Los métodos que usan instrumentos científicos, reciben el nombre general de *métodos objetivos*.

En los albores de la Ciencia, las leyes fueron descubiertas frecuentemente por el uso de métodos subjetivos. El progreso fue lento, hasta que tales métodos fueron reemplazados por métodos objetivos, usando instrumentos de medida diseñados para conseguir una precisión cada vez mayor.

Es un hecho verdadero que muchos descubrimientos científicos fueron logrados en el pasado con aparatos y equipos que ahora calificaríamos de rudimentarios; pero lo que nos ha llevado a descubrimientos con un contenido teórico de gran alcance y considerable importancia práctica en el progreso de la civilización, principalmente en las últimas décadas, es, con exactitud, el desarrollo de los instrumentos y aparatos de precisión.

Como introducción al estudio de la Física, consideraremos primero algunos experimentos que ilustran las falsas conclusiones a que se puede llegar fácilmente usando los métodos subjetivos de observación. Aunque estos experimentos son más bien recreativos, tienen también un aspecto serio, ya que demuestran la necesidad de usar métodos objetivos para el progreso de la ciencia.

2 Métodos subjetivos. Si alguien nos pide que determinemos la temperatura del agua en un recipiente, el primer impulso, si el agua no está demasiado caliente, será usar las manos o los dedos sin molestarse en buscar un termómetro. Para ilustrar la inexactitud del tacto en la determinación de la temperatura, consideremos tres vasijas con agua, como se muestran en la fig. A.

Si se pone la mano por algún tiempo en la vasija que contiene agua *fría*, y luego se sumerge en la de agua *tibia*, los sentidos nos dirán que está *caliente*. En cambio, si se mete primero la mano en el agua *ca-*



Fig. A. Experimento que ilustra la inexactitud de los métodos subjetivos de medición.

liente y después se sumerge en agua *tibia*, los sentidos determinarán que está *fría*. Su conclusión, en ambos casos, está influida por sus experiencias inmediatamente anteriores a la determinación de la temperatura en la vasija de en medio. Cuando se usa un termómetro en este experimento, se encuentra la misma temperatura en ambos casos. Aunque posteriormente se le llamará método objetivo de medición a este sistema, todavía hemos de confiar en los sentidos para obtener la lectura de la escala termométrica.

Si se va a medir la longitud y anchura de la cubierta de la mesa, no debemos medirla en *palmas*, sino usar una *cinta o regla de medición marcada en metros, yardas o pies*. De igual manera, el tiempo que necesita un corredor en los *cien metros planos*, se medirá usando un *reloj o un cronómetro* y no por las *palpitaciones del corazón o por el pulso*.

3 El ojo. Al efectuar mediciones científicas, se considera al ojo como el instrumento registrador más útil de todos. Pero hay ocasiones en que no debe usarse para efectuar observaciones directas, ya que no se puede confiar en él para que observe las cosas como realmente son. Para ilustrar lo poco seguro que es el sentido de la vista en algunos casos, consideraremos en la siguiente sección algunos ejemplos comúnmente llamados *ilusiones ópticas*.

A pesar de sus imperfecciones y limitaciones, que son muchas, y a veces muy serias, el ojo humano es un instrumento óp-

tico maravilloso. Es un don inapreciable de la Naturaleza para el hombre, que, con la luz, lo capacita para gozar las bellezas de la forma, del color y del movimiento. Ópticamente, el ojo es como una cámara extremadamente precisa, con un complicado sistema de lentes en un lado y una pantalla sensible o película fotográfica en el otro, llamada *retina*. (Véase la fig. B.) El medio refractor del ojo consta de la *córnea*, el *humor acuoso*, el *cristalino* y el *humor vítreo*, y su función es enfocar sobre la retina la imagen de los objetos que van a verse. Como las cámaras fotográficas, el ojo tiene un *diafragma o iris*, que se abre más cuando la luz es tenue y se reduce a una *punta de alfiler* cuando la luz solar es muy brillante. El iris contiene el pigmento que determina el color de los ojos.

Los impulsos luminosos son recibidos en la retina del ojo por pequeños *bastones y conos*, cuya función parece ser la conversión de la luz en electricidad. Cada cono o bastón está conectado con un nervio particular que conduce la electricidad a través del nervio óptico hasta el cerebro. La manera como son producidos estos impulsos eléctricos por los conos y bastones, actuando como pilas, y la manera como son interpretados por el cerebro, como visión, todavía no ha sido bien comprendida por los científicos. Los experimentos realizados parecen indicar que los conos responden sólo a la luz brillante y son particularmente responsables de la detección y distinción de los colores, mientras que los bastones son sensibles a la luz muy débil, al movimiento y a las pequeñas variaciones de intensidad luminosa.

En el centro de la retina hay un pequeño punto amarillento llamado la *mancha amarilla*. Esta pequeña región contiene muchos conos, pero no tiene bastones. Las palabras y letras de esta página son enfocadas, al leerlas, en este punto del ojo, una después de otra. Nótese al leer una palabra, o particularmente una sola letra, cómo el resto de la página y aun las palabras y letras cercanas, parecen borrosas.

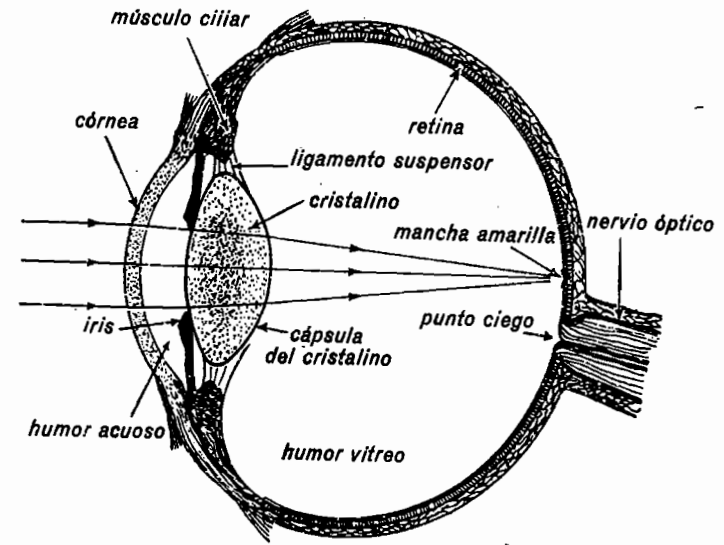


Fig. B. Corte del ojo humano.

Se acostumbra dividir en dos partes todos los datos sensoriales que contribuyen a la percepción visual de cualquier objeto: primero, la formación de la imagen en la retina por la luz que viene del objeto y segundo, la propiedad integradora del cerebro para interpretar esta imagen.

4 El punto ciego. Bastante cerca de la mancha amarilla de la retina del ojo, hay una pequeña región llamada *punto ciego*. Este punto, que es insensible a la luz, es

en el círculo, se encontrará una posición (a unos 20 ó 25 cm del ojo) donde desaparece el cuadrado. Cuando se abren los dos ojos, no hay ninguna posición donde se pierda el cuadrado o el círculo. Un ojo siempre ve aquella parte del objeto para la cual el otro ojo es ciego. Un experimento semejante con el ojo derecho enfocado en el cuadro, hará desaparecer el círculo.

5 Ilusiones ópticas. Sólo presentaremos algunas de las más interesantes ilusiones óp-



Fig. C. Ilustración para buscar el punto ciego del ojo.

el lugar donde se une el nervio óptico al globo del ojo. La existencia del punto ciego se puede demostrar cerrando el ojo derecho, sosteniendo el libro con el brazo bien extendido, y mirando fijamente al centro del círculo de la fig. C con el ojo izquierdo. A esta distancia se ven el círculo y el cuadrado. Ahora, si se mueve el libro lentamente acercándolo al ojo, fijándose todavía

de entre los cientos de ellas que son conocidas. En la fig. D hay un grupo de seis dibujos clasificados como ilusiones creadas con *líneas y ángulos*. En a), la primera figura, la anchura del ala del sombrero es igual a la altura de la copa del mismo; en b), las líneas diagonales, trazadas en cada paralelogramo, son de la misma longitud; en c), el círculo es perfecto y parece

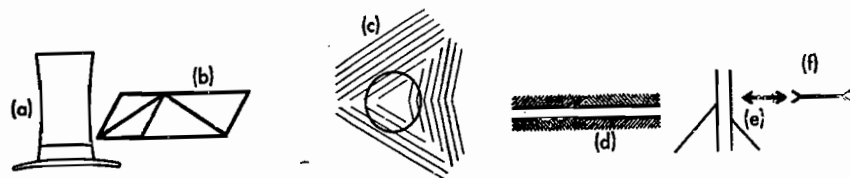


Fig. D. Ilusiones ópticas creadas con líneas y ángulos.

estar deformado; en la figura *d*), las dos líneas horizontales son rectas y paralelas, y en *f*) son de la misma longitud. En *e*), la línea inclinada de la derecha, al prolongarse, interceptará a la línea inclinada de la izquierda en el punto donde ésta toca a la vertical.

La fig. E es un ejemplo de *perspectiva*, una ilusión que sugiere profundidad en las imágenes que realmente son planas. En realidad, éste es un diagrama lineal, que contiene tres figuras humanas de igual altura. Por medio de líneas convergentes, se hacen aparecer de diferente altura las figuras humanas. La experiencia nos ha acostumbrado, desde nuestra infancia, a interpretar las líneas convergentes como profundidad.

El siguiente grupo de ilusiones, mostradas en la fig. F, se clasifican como *figuras equívocas*. Estas ilustran el fenómeno de la *fluctuación* del mecanismo de la visión. En *a*), pueden verse seis cubos apilados, tres abajo, luego dos y luego uno, o bien, siete cubos apilados, primero dos, luego tres y luego otros dos. En *b*) se ve una hoja doblada, con el ángulo, ya sea abierto hacia nosotros o hacia el papel. En *c*) hay un tramo de escalera, visto desde arriba o visto desde abajo.

La fig. F *d*) es una de las más interesantes entre todas las ilusiones. Para apreciar su efecto plenamente, debe efectuarse el experimento con un pequeño cubo de alambre de unos tres centímetros por lado. Se sostiene el cubo mediante un pequeño mango fijo a un vértice, y se mira



Fig. E. ¿Qué figura es más alta? Mídolas.

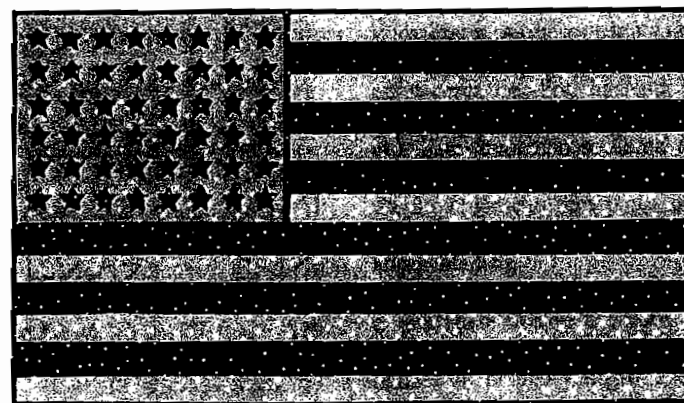


Fig. J.—La fatiga de la retina permite ver estos objetos en sus colores naturales.

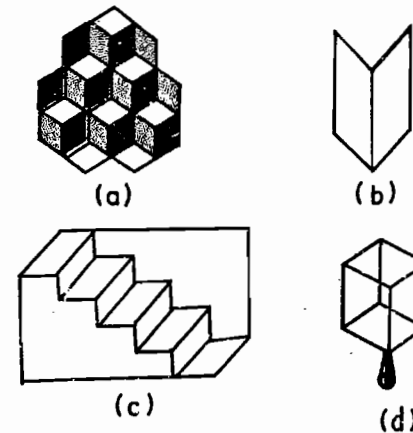


Fig. F. Ilusiones ópticas por fluctuación de la atención.

con un solo ojo a una distancia entre 30 y 60 cm. Por el principio de la fluctuación, el observador trata de hacer que la esquina más cercana resulte ser la más distante. Cuando se ha conseguido esto, si se hace girar en torno a un eje horizontal o vertical, parecerá girar en la dirección

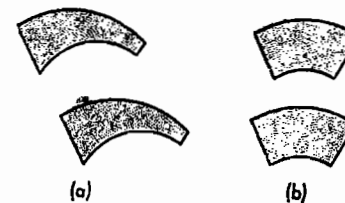


Fig. G. Ilusiones ópticas de área.

opuesta. Se necesita un poco de práctica en la fluctuación del sentido de la vista, pero vale la pena intentarlo.

En la fig. G hay dos pares de figuras similares de igual área. Las líneas convergentes de los extremos, hacen que en cada caso parezcan ser mayores las inferiores. Tales figuras deben recortarse en cartón blanco y sostenerlas una sobre la otra. Cuando la figura de arriba se intercambia con la correspondiente de abajo, parece que una crece y la otra se reduce frente a nuestros ojos.

En la fig. H a), hay dos cuadrados pequeños de igual área: un cuadrado blanco

en fondo negro, y un cuadrado negro en fondo blanco. Cuando se forma una imagen de ellos en la retina del ojo, los conos y los bastones que quedan más allá de las orillas blancas, son estimulados por los que están cerca de ellos, haciendo que el cuadro blanco parezca más grande que el negro. Este fenómeno se llama *irradiación* o *contraste de brillo*. En la fig. H (b) se ilustra un fenómeno semejante, donde se ven puntos grises en las intersecciones de las líneas blancas.

6 **Fatiga e ilusión a colores.** Todas las ilusiones descritas antes se han limitado a figuras en blanco y negro. Existe un gran número de ilusiones, clasificadas como *ilusiones de color*. En la fig. I, se ilustran dos de ellas. El disco pintado de negro y blanco, como se muestra en (a), parece estar

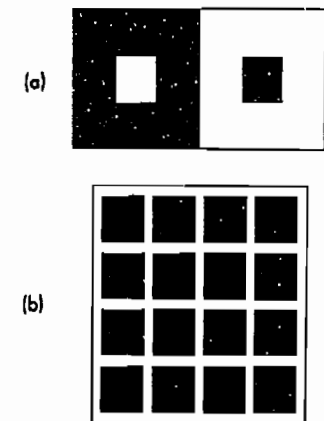


Fig. H. Objetos claros y oscuros ilustrando el fenómeno de la irradiación.

coloreado cuando se le hace girar a velocidades relativamente pequeñas. Los colores que se ven son muy tenues, de tonos violeta, azul, verde, amarillo y rosa. La frecuencia de la rueda deberá ser de 4 a 15 revoluciones por segundo. La explicación que, generalmente, se da a este fenómeno, es que la retina responde más rápidamente a unos colores que a otros. Ya que la imagen blanca del disco se mueve en la retina y la

luz blanca contiene todos los colores del arco iris, en cada punto de la retina, algunos colores serán percibidos antes que los otros, produciéndose el efecto de color.

El diagrama (b) de la fig. I, ilustra la aparición del color debida al contraste. Si, por ejemplo, es vista una mancha de luz blanca en un fondo rojo, la mancha pare-

bles a ese color. Cuando la misma zona de la retina se expone posteriormente a la luz blanca, los conos antes inactivos, responden más enérgicamente que aquellos que fueron estimulados, y se verá el color complementario.

Para observar las imágenes impresas en color, fije la atención en la estrella negra

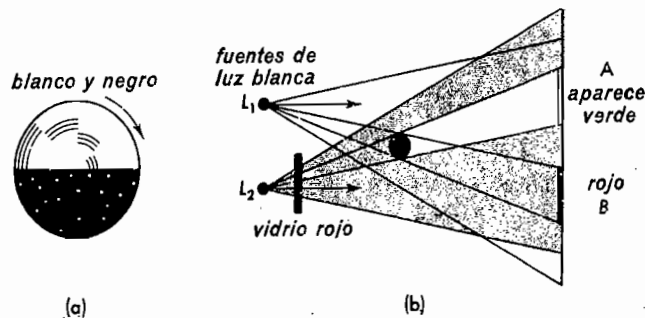


Fig. I. Diagramas de los experimentos para demostrar las ilusiones de color.

cerá verde pálida. Si, por otra parte, se ve una mancha de luz blanca en un fondo verde, parecerá ser color de rosa. El experimento puede efectuarse con dos lámparas de arco semejantes, produciendo luz blanca. Se hace que cada una de ellas proyecte la sombra de la varilla *R* sobre una pantalla blanca. Si se pone una placa de vidrio rojo, como se muestra en la figura, frente a la luz *L*₂, la mancha de luz blanca en *A* parecerá ser verde pálida. Si se coloca un vidrio verde en lugar del rojo, la región *A* parecerá rosa. En ambos casos, *A* recibe luz sólo de *L*₁ y, por lo tanto, debe ser en realidad blanca. El rojo y el verde, en tonos apropiados, son complementarios y producen, cuando se juntan, luz blanca. El tema de la mezcla de colores será presentado con detalle en el Capítulo 22.

7 Imágenes complementarias. Cuando los ojos son sometidos a la luz brillante por un tiempo corto, la retina parece mostrar cierto cansancio o *fatiga*. Si se somete cualquier parte de la retina en forma continua a un color en particular, se produce el cansancio sólo en aquellos conos que son sensi-

inferior derecha de la bandera de la fig. J y manténgala ahí por unos 15 ó 20 segundos. Luego, vuelva su vista hacia una pared blanca o hacia el cielo claro, y en uno o dos segundos aparecerá la bandera de los Estados Unidos de Norteamérica con sus verdaderos colores. Se pueden observar ejemplos similares con las otras ilustraciones en colores.

Las imágenes producidas en esta forma, resultan siempre coloreadas con los colores complementarios de los de la imagen original; el blanco resulta negro; el amarillo, azul; el verde, magenta (rojo púrpura); el magenta se vuelve verde, etc. (Para explicación detallada de los colores complementarios, véase el Capítulo 22.)

8 El efecto estroboscópico. Cuando en las películas cinematográficas, un vehículo de ruedas con rayos va deteniéndose, a veces parece que las ruedas se paran, giran para atrás, se detienen nuevamente, giran hacia adelante y luego se vuelven a parar. Este fenómeno, conocido como *efecto estroboscópico*, se debe a la iluminación intermitente de la pantalla cinematográfica y se

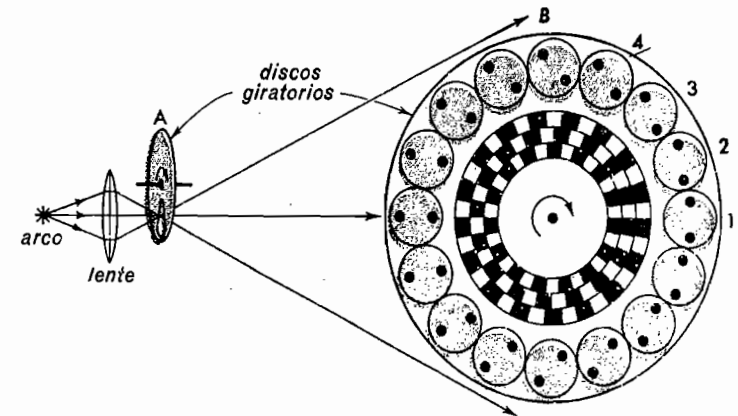


Fig. K. Demostración del efecto estroboscópico.

puede ilustrar también de otras maneras. En la fig. K, se ve una interesante experiencia ilustrativa de este fenómeno. Se montan dos discos en los ejes de dos motores separados. El disco menor, *A*, con una ranura estrecha, se usa para interrumpir el rayo luminoso que cae sobre el disco más grande. El disco *B* es blanco y tiene círculos y puntos negros, dibujados exactamente como se ilustra en la figura. Supongamos ahora que el disco *A* efectúa 16 revoluciones cada segundo, iluminando el disco *B* con 16 destellos luminosos cada segundo, y que llega un destello de luz al disco cuando está en la posición ilustrada en la figura. Concentremos nuestra atención en el círculo que está en la posición (1); los dos puntos encerrados dentro del círculo, están uno sobre otro. Cuando se produzca el segundo destello, el círculo (2) estará en la posición (1) y los dos puntos parecerán haberse movido ligeramente, girando como avan-

zan las manecillas de un reloj. Cuando venga el siguiente destello, el círculo (3) estará en la posición (1) y los dos puntos habrán girado algo más. Ese proceso continuado hará ver a los círculos estacionarios y los puntos girando dentro de ellos.

Si en cualquier experimento del tipo que acabamos de describir, los destellos de luz

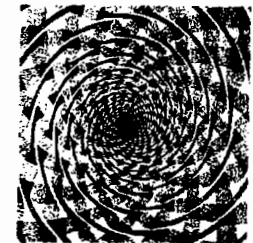


Fig. M. Círculos que parecen espirales.

se hacen menos frecuentes que 16 destellos por segundo, el objeto iluminado parecerá parpadear notablemente; pero cuando los destellos van aumentando su frecuencia, el parpadeo desaparece por completo y la iluminación parece ser continua. La razón de esto es que la imagen formada en la retina se conserva por 1/16 de segundo aproximadamente. Esto se llama *persistencia de la visión*.

9 Círculos y espirales. Si esta página del libro se sostiene a unos 30 cm frente



Fig. L. Ilusión de rotación.

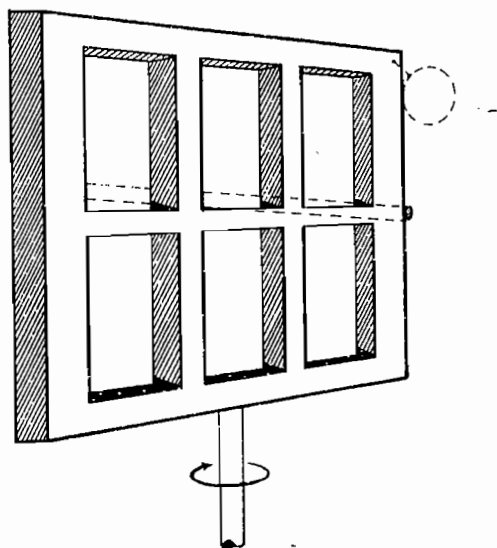


Fig. N. Girando lenta y continuamente en un sentido, esta ventana de forma trapezoidal parece girar alternativamente en un sentido y en otro.

a los ojos del observador y se mueve rápidamente en un círculo de unos 5 a 8 cm de diámetro, la espiral de la fig. L parecerá estar girando en la dirección en que se mueve el libro. Una serie de círculos concéntricos oscuros y claros producirán el mismo efecto, debiéndose la rotación aparente a la persistencia de la visión.

Hemos visto, en las ilustraciones anteriores, que por inspección cuidadosa se pueden romper o atenuar las ilusiones ópticas. Hay otras en cambio, que resisten dicha inspección. No habrá manera de lograr ver círculos en la fig. M; por mucho que nos quedemos mirándola, o pensemos sobre ella, seguiremos viendo espirales.

10 La ventana trapezoidal. Una de las más sorprendentes ilusiones ópticas en perspectiva, es la de una ventana que tenga el diseño de la fig. N y esté en lenta rotación. Ésta se puede cortar de una sola hoja de madera contrachapada (triplay) de 1/4 de pulgada de grueso, que se pinta de blanco,

gris y negro por ambos lados,* y se monta en la flecha de un motor rotatorio lento.

Vista en un cuarto oscuro y alumbrada de frente y por los lados, con dos luces ocultas al observador, la ventana parece girar primero en una dirección y luego en otra. Se obtiene un efecto adicional colgando una bola de color brillante en la esquina superior del extremo chico. Parece que la bola continúa girando en la misma dirección, mientras que la ventana parece oscilar hacia atrás y adelante.

Otro efecto impresionante se logra poniendo una barra coloreada a través del claro central superior, como se indica con línea de puntos en la figura. El comportamiento aparente de la barra necesita ser visto para poderlo apreciar.

* Al construir esta ventana para usarla en clase, deben ampliarse todas las dimensiones en proporción a partir de la fig. N con una altura máxima de 40 cm.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cómo mediría la longitud de una mesa usando un método subjetivo de medición?
2. ¿Cómo mediría la temperatura del agua en una vasija, usando un método objetivo?
3. Explicar brevemente cómo interviene el método subjetivo en la medición de la temperatura con un termómetro.
4. ¿Qué es el efecto, estroboscópico? Explicarlo brevemente.
5. Explicar por qué las ruedas de un carrerón pueden aparecer girando hacia atrás en una película cuando la carreta avanza hacia adelante.
6. Explicar brevemente por qué parpadean las películas cinematográficas cuando el proyector corre muy despacio, y no lo hacen cuando corre aprisa.
7. ¿En qué forma están involucrados algunos de los principios desarrollados en esta lección en las cosas que suceden en el mundo que nos rodea?

UNIDADES DE MEDICION

Se ha definido la Física como la rama del conocimiento y la experimentación que se ocupa del mundo inanimado y sus fenómenos. Comprende la *mecánica*, las *propiedades de la materia*, el *calor*, el *sonido*, la *luz*, la *electricidad* y el *magnetismo*, los *rayos catódicos*, los *rayos X*, la *radiactividad*, la *estructura del átomo*, los *rayos cósmicos*, la *desintegración atómica* y la *energía atómica*. Se dice que la Física es una ciencia exacta, porque usa instrumentos de medida para efectuar experimentos y observaciones precisas. A partir de las mediciones realizadas en estos experimentos, se desarrollan teorías y leyes que luego son usadas para pronosticar los resultados de nuevos experimentos. Si los nuevos resultados experimentales no concuerdan con la teoría, entonces ésta se modifica para que esté de acuerdo con ellos, o se desecha y reemplaza por otra teoría mejor. Aquellos que efectúan los experimentos nuevos, son llamados *físicos experimentales*, y los que formulan las teorías basadas en los experimentos, son los *físicos teóricos*. La naturaleza de la Física y sus métodos objetivos de experimentación, justifican que se la considere como una de las ciencias más exactas.

1.1 Unidades fundamentales y derivadas. Ya que la Física es una ciencia basada en medidas exactas, es indispensable que el estudiante se familiarice primero con algunos de los dispositivos de medición más comunes y las unidades en las cuales están generalmente divididos. Toda medida, sea de una distancia, peso, intervalo de tiempo o de cualquier otra especie, requiere *dos* elementos: primero, un *número*; segundo, una *unidad*. Como resultado de la medición de

diferentes distancias, se podría obtener, por ejemplo, 20 metros, 5 kilómetros, 3 millas; o, al determinar diferentes masas, encontrar 6 kilogramos, 45 gramos; o, como respuesta a una medida de diversos intervalos de tiempo, tener 7 horas, 26 segundos, etc. Como consecuencia de algún experimento o en la lectura de ciertos aparatos, pueden aparecer mediciones de 10.7 calorías, 90 kilovatios, 6 voltios, etc. En cada caso, la *unidad* es tan necesaria como el *número*, para expresar el valor de la cantidad medida.

Aunque hay muchas unidades diferentes usadas en mecánica, cada una se puede expresar en función de tres unidades especiales como máximo. Estas tres, llamadas *unidades fundamentales*, son las unidades de *longitud*, *masa* y *tiempo*. Todas las demás unidades se llaman *derivadas*, ya que, como veremos después, siempre pueden expresarse como combinaciones de las unidades fundamentales.

En general, hay dos sistemas de unidades fundamentales, cuyo uso está muy extendido: a) el *sistema métrico*, y b) el *sistema inglés*. En todo el mundo, las observaciones científicas se hacen casi siempre usando unidades del sistema métrico. Este sistema emplea el *metro patrón*, como unidad de longitud; el *kilogramo patrón*, como unidad de masa, y el *segundo*, como unidad de tiempo. El sistema inglés, emplea al *pie*, como unidad de longitud; la *libra* como unidad de peso, y el *segundo*, como unidad de tiempo.

1.2 El metro patrón y la yarda patrón. El metro patrón es una barra de platino-iridio, que se conserva en las bóvedas de la

Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Sèvres, Francia, cerca de París. México es dueño de un duplicado de este patrón, que se guarda en la Dirección General de Normas de la Secretaría de Economía. Estados Unidos tiene tres, y casi todas las demás naciones del mundo son dueñas de una copia, por lo menos. Cada uno de estos

1 centímetro (cm) = 10 milímetros (mm)

1 000 milímetros (mm) = 1 metro (m)

En algunos países, como los Estados Unidos, usan continuamente la *yarda* (yd) como unidad de longitud. Por un acta del Congreso de 1866 se estableció legalmente que la yarda en los Estados Unidos vale



Fig. 1A. Escala en centímetros y pulgadas.

duplicados puede llamarse *metro patrón internacional* y, actualmente, son el patrón de longitud en los países de habla española, así como también en Estados Unidos y en Europa. Con estos patrones se comprueban todas las reglas y cintas métricas.

Cuando se construyó el primer metro patrón, se trató de que tuviera la longitud de una diezmillonésima parte de la distancia que hay entre uno de los polos y el Ecuador. La separación entre las dos marcas grabadas en la barra de platino-iridio, cerca de cada extremo, es tomada ahora como un metro exacto, aunque las mediciones más exactas, hechas recientemente, han demostrado que la distancia del polo al Ecuador, es aproximadamente igual a 10 000 880 metros patrón.

El metro patrón se divide en cien partes iguales. Cada una de estas partes se llama *centímetro*.

1 metro = 100 centímetros

o abreviado,

1 m = 100 cm

El centímetro, a su vez, se divide en diez partes iguales. Cada una de estas partes se llama *milímetro* (véase la fig. 1A).

3 600/3 937 partes de un metro patrón. Como la yarda está dividida en 36 pulgadas (in):

1 metro (m) = 39.37 pulgadas (in)

Con doce pulgadas en un pie (ft):

3 pies (ft) = 1 yarda (yd)

1 pie (ft) = 30.48 cm

1 pulgada (in) = 2.54 cm

Los tamaños de la pulgada y sus fracciones comparados con el centímetro y el milímetro, quedan ilustrados en la fig. 1A.

Cuando se van a medir distancias grandes, es común y conveniente el uso de unidades de longitud mayores. Estas unidades son el *kilómetro* (km), en el sistema métrico, y la *milla* (mi), en el sistema inglés. Un kilómetro equivale a mil metros y una milla equivale a cinco mil doscientos ochenta pies.

1 kilómetro (km) = 1 000 metros (m)

1 milla (mi) = 5 280 pies (ft)

La relación entre el kilómetro y la milla es:

1 mi = 1.609 km

1 km = 0.621 mi

Para otras equivalencias, ver la tabla A.

TABLA A. TABLA DE FACTORES DE CONVERSIÓN DE UNIDADES DE LONGITUD.

	km	m	cm	in	ft	mi
1 kilómetro =	1	1000	100,000	39,370	3280.83	0.62140
1 metro =	0.00100	1	100	39.370	3.28083	6.21×10^{-4}
1 centímetro =	1.0×10^{-5}	0.0100	1	0.39370	0.032808	6.21×10^{-6}
1 pulgada =	2.54×10^{-5}	0.02540	2.5400	1	0.08333	1.58×10^{-5}
1 pie =	3.05×10^{-4}	0.30480	30.480	12	1	1.89×10^{-4}
1 milla =	1.60934	1609.34	160,934	63,360	5280	1

1.3 El kilogramo patrón y la libra patrón.

La unidad patrón de masa es el *kilogramo*, una pieza de platino, también conservada en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas, en Sèvres, Francia, cerca de París. México y los demás países iberoamericanos tienen un duplicado de este kilogramo patrón, cada uno. Los Estados Unidos tienen dos. El kilogramo se divide en 1 000 partes iguales llamadas *gramos*.

1 kilogramo (kg) = 1 000 gramos (g)

Originalmente se basó el kilogramo patrón en el gramo, siendo el gramo la masa

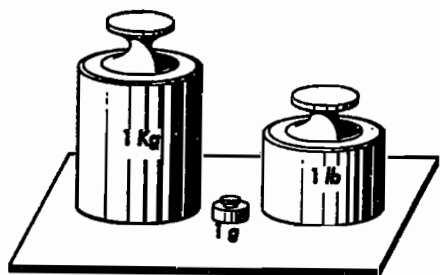


Fig. 1B. La masa del kilogramo patrón es 2.2 veces mayor que la masa de la libra patrón.

de un centímetro cúbico de agua pura a cuatro grados centígrados de temperatura.

La *libra patrón* es definida en función del kilogramo patrón, estableciéndose que su masa será igual a 0.4536 kilogramos. De aquí obtenemos las siguientes relaciones:

1 lb = 0.4536 kg 1 oz = 28.35 g
 1 lb = 16 oz 1 kg = 2.205 lb
 1 lb = 453.6 g 1 ton corta = 2 000 lb
 1 ton métr = 1 000 kg

El estudiante deberá aprender algunos de los números anteriores, y al mismo tiem-

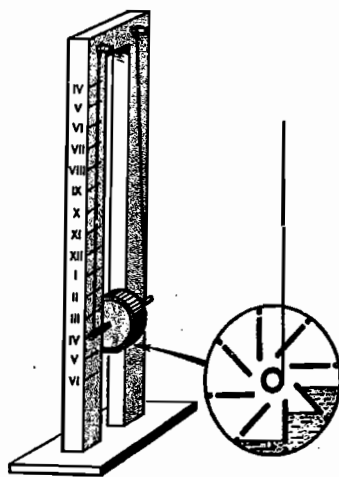


Fig. 1C. Reloj de agua.

po, familiarizarse con los nombres de estas unidades.

1.4 Relojes históricos. Los instrumentos para la medida del tiempo se remontan históricamente a los babilonios, por lo menos, y probablemente a la época de los griegos, cinco siglos antes de Cristo. Los primeros aparatos conocidos para medir el tiempo,

fueron principalmente relojes de agua, algunos de diseño muy sencillo y otros más complicados. Estos relojes se basaban en el principio muy elemental de que se necesita el mismo tiempo para que fluyan cantidades iguales de agua a través de una pequeña abertura. El *reloj de arena*, que se basa en el mismo principio y usa arena en vez de agua, es un descendiente del reloj de agua, y data de la Edad Media.

Un reloj de agua, de diseño bastante sencillo, se ilustra en la fig. 1 C. Los pequeños agujeros en los bordes de las aspas (véase el detalle en el diagrama), dejan que el agua fluya de un compartimiento a otro. Esto permite que el cilindro gire lentamente, desenrollando las cuerdas de las que está suspendido.

El *reloj de sol* se remonta al astrónomo caldeo Berosus, que vivió en el tiempo de Alejandro el Grande, 300 a.C. En los parques públicos se usan ahora los relojes de sol como objetos de adorno. Un reloj de sol de diseño común, como el ilustrado en la fig. 1 D, consta esencialmente de una *aguja* llamada *saeta*, montada en cierto ángulo sobre una placa circular llamada *cuadrante*. La saeta se monta en el plano vertical norte-sur. El borde de la saeta es paralelo al eje de rotación de la Tierra, y sirve para proyectar una sombra sobre el cuadrante que está marcado con las horas del día. Se deben hacer pequeñas correcciones al tiempo indicado por la sombra, debido al movimiento aparente de *precesión* anual del eje de la Tierra. Estas correcciones, que llegan a ser de varios minutos, generalmente están marcadas en el cuadrante. Por ejemplo, el cuadrante del reloj de sol de la Universidad de California, en los Estados Unidos, tiene las siguientes correcciones:

Ene. 10, + 17 min.	Jul. 19, + 15 min.
Feb. 9, + 23 "	Ago. 18, + 18 "
Mar. 11, + 19 "	Sep. 17, + 4 "
Abr. 10, + 8 "	Oct. 17, - 5 "
Mayo 20, + 5 "	Nov. 16, - 6 "
Jun. 19, + 10 "	Dic. 16, + 5 "

Los relojes modernos se regulan por el balanceo de un péndulo o por la oscilación

de un volante. Así operan los relojes de pared y los relojes de pulsera. Estos aparatos se estudiarán posteriormente en la sección dedicada a vibraciones y ondas (Cap. 18). Los relojes eléctricos que se encuentran frecuentemente en las oficinas son movidos por diminutos motores eléctricos. La marcha de estos motores está regulada por la planta urbana de energía

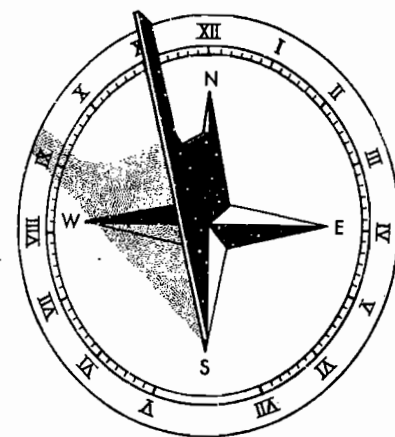


Fig. 1D. Reloj de sol.

eléctrica que vigila la frecuencia de la corriente alterna que abastece a las líneas de transmisión eléctrica. El reloj principal de las centrales de energía, frecuentemente, es de péndulo.

1.5 El tiempo y el día solar medio. Los astrónomos han considerado siempre tres clases de tiempo: primero, el *tiempo sideral*; segundo, el *tiempo solar aparente*, y tercero, el *tiempo solar medio*. Este último es el que se usa en la vida diaria. Si colocamos la saeta de un reloj de sol en el plano vertical norte-sur en un determinado lugar de la superficie de la Tierra, se llama un día solar aparente al intervalo de tiempo que transcurre entre dos tránsitos sucesivos de la sombra del sol sobre la marca de las doce en el cuadrante del reloj. Este intervalo de tiempo varía ligeramente de un

día a otro, debido a varias razones, siendo una de ellas la forma elíptica de la órbita terrestre. Un día solar aparente del mes de diciembre, es cerca de un minuto más largo que un día solar aparente de septiembre. Se comprende fácilmente que este día solar aparente no puede servir para regular los relojes tan exactos que ahora usamos.

La duración *promedio* de todos los días solares aparentes de un año solar, se llama *día solar medio*. Este es un intervalo de tiempo satisfactorio para nosotros, ya que no varía y se puede conservar mediante relojes regulados. El intervalo de tiempo llamado *segundo*, se define como $1/86\,400$ del día solar medio.

$$1 \text{ seg} = \frac{1}{60} \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{24} = \frac{1}{86\,400} \text{ día}$$

Hay 365.2421 días solares medios en un año solar; es decir que, con respecto al Sol, la Tierra efectúa 365.2421 vueltas sobre su eje, mientras completa una revolución en su órbita.

Para usos astronómicos se usa una escala de tiempo diferente, llamada tiempo sideral. Hay un día sideral más en el año solar que el número de días solares medios. Un año solar es igual a 366.2421 días siderales. La razón de que exista este día adicional, es que al efectuar una vuelta completa alrededor del Sol, siguiendo su órbita, la Tierra ha efectuado realmente 366.2421 revoluciones con relación a las estrellas fijas. El segundo sideral medido por un reloj astronómico, será, en consecuencia, ligeramente más corto que un se-

gundo marcado por un reloj ordinario que mida el tiempo solar medio.

1.6 Unidades del Sistema Métrico Decimal. Casi todos los experimentos científicos en el mundo entero se efectúan usando unidades del Sistema Métrico Decimal. En estas unidades, las distancias se miden en milímetros, centímetros, metros o kilómetros. La masa se mide en gramos o kilogramos; y el tiempo se mide en segundos, minutos o en horas. En este sistema, la abreviatura CGS significa, *centímetro, gramo, segundo*, y MKS significa *metro, kilogramo, segundo*.

El sistema inglés se usa en la vida práctica en los Estados Unidos y países de la Comunidad Británica, y emplea pies, yardas o millas como unidades de longitud; onzas, libras o toneladas cortas como unidades de peso o fuerza, de las cuales puede calcularse la masa; y el segundo como unidad de tiempo. En estos países se sigue usando el sistema inglés, con sus complicadas fracciones, porque está firmemente arraigado en la vida común y esto hace muy difícil que se pueda llegar a sustituirlo completamente con el Sistema Métrico Decimal; pero actualmente hay un movimiento muy fuerte de opinión, encaminado a lograr este cambio.

La principal ventaja del Sistema Métrico Decimal, comparado con el sistema inglés, es que todas las unidades se dividen en décimas y centésimas partes. Esto permite que las distancias y masas fraccionarias, se expresen en forma decimal. Los decimales, como bien se sabe, son manejados más fácilmente en las operaciones aritméticas.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuántos metros equivalen a 25 mi? (Resp. 40 234 m.)

2. ¿Cuántas millas hay en 70 km?

3. ¿Cuántos metros hay en 5 ft? (Resp. 1.52 m.)

4. Encontrar la distancia a la luna en metros si es de 239 000 mi.

5. Un automóvil es de 16 ft, 4 in de largo. Encontrar su longitud en metros. (Resp. 4.98 m.)

6. Encontrar la altura en metros de un hombre de 5 ft, 10 in de alto.

7. Encontrar el número de metros cuadrados en una milla cuadrada. (Respuesta $2\,589\,000 \text{ m}^2$)

8. ¿Cuántos metros cuadrados hay en un acre? Una milla cuadrada contiene 640 acres.

9. Un hombre de 75 kg, ¿cuántas libras pesa? (Resp. 165.4 lb)

10. Un carro pesa 4 200 lb. ¿Cuál es su masa equivalente en kilogramos?

11. Un cuarto de galón de agua pesa 2 lb. ¿Cuál es su masa equivalente en gramos? (Resp. 907.2 g.)

12. ¿Cuál es el peso en libras que equivale a una masa de 45 kg?

13. ¿Qué masa en kilogramos equivale a un peso de 50 lb? (Resp. 22.7 kg)

14. ¿Cuántos segundos hay en un día?

15. ¿Cuántos segundos hay en una semana? (Resp. 604 800 seg.)

16. Encontrar el número de segundos que hay en 5 hr y 25 min.

17. Un avión a retropropulsión tiene un peso de 100 000 lb. ¿Cuál es su masa en kg? (Resp. 45 360 kg.)

18. ¿Cuál es la altura de un hombre en milímetros si mide 6 ft de alto?

19. Encontrar el número de milímetros que hay en una yarda. (Resp. 914 mm.)

20. ¿Cuál es la circunferencia en milímetros de una bola de 6 in de diámetro?

RAPIDEZ, VELOCIDAD Y ACELERACION

La Mecánica se define como la rama de la Física que se ocupa de estudiar los movimientos y estados de los cuerpos materiales. Generalmente se divide en dos partes, la primera llamada *cinemática*, que describe los varios tipos de movimientos, y la segunda, llamada *dinámica*, trata de las causas que hacen cambiar los movimientos. La *dinámica*, a su vez, se divide en dos partes, *estática* y *cinética*.

La *estática* estudia los cuerpos en estado de equilibrio, condición que se logra por fuerzas equilibradas, mientras que la *cinética* estudia los cambios de movimiento producidos por una o más fuerzas no equilibradas. Se presentarán primero los conceptos elementales de *rapidez* y *velocidad* como introducción a la *cinética*.

2.1 Velocidad. La *velocidad* se define como la *rapidez* de cambio de posición. Ya que el cambio de posición de un cuerpo

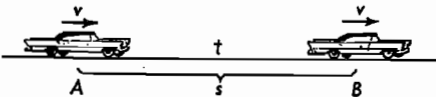


Fig. 2A. Diagrama de un cuerpo moviéndose con velocidad constante.

se mide por la distancia recorrida, esta definición de velocidad puede escribirse así:

$$\text{Vel. media} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{tiempo}} \quad (2a)$$

Como una ecuación algebraica:

$$v = \frac{d}{t} \quad (2b)$$

Donde v es la velocidad, d es la distancia recorrida y t el tiempo transcurrido.

En la fig. 2A se ilustra el cambio de posición. Un automóvil, viajando con velocidad uniforme a lo largo de una línea recta, pasa por el punto A en cierto instante y por el punto B en otro momento posterior. Al sustituir en la ecuación (2b), la distancia recorrida será AB, y el espacio de tiempo entre A y B será t segundos.

Ejemplo 1. Un hombre necesita 2 horas para llevar su automóvil a una ciudad que está a 120 kilómetros hacia el Este. ¿Cuál es su velocidad media?

Solución. La distancia recorrida $d = 120$ kilómetros y el intervalo de tiempo $t = 2$ horas. Por lo tanto, la velocidad es:

$$v = \frac{120 \text{ km}}{2 \text{ horas}} = 60 \frac{\text{km}}{\text{hora}} \quad (2c)$$

La respuesta es 60 km/hora hacia el Este. Las unidades son tan importantes como los números y deben ser incluidas en la respuesta.

Si en el resultado del ejemplo anterior se reemplaza el tiempo de 1 hora en el denominador por su equivalencia de 3 600 segundos, la velocidad de 60 km/hora se convierte en

$$v = 60 \frac{\text{km}}{\text{hora}} = 60 \frac{\text{km}}{3\,600 \text{ seg}} = 0.0167 \frac{\text{km}}{\text{seg}} \quad (2d)$$

Si al mismo tiempo la distancia de 1 km del numerador se sustituye por su equivalente de 1 000 m,

$$v = 60 \frac{\text{km}}{\text{hora}} = 60 \frac{1\,000 \text{ m}}{3\,600 \text{ seg}} = 16.7 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \quad (2e)$$

Las tres respuestas dadas, 60 km/hora, 0.0167 km/seg y 16.7 m/seg, son exactamente iguales, sólo que están expresadas en diferentes unidades.

Ejemplo 2. Un tren de juguete corre a lo largo de una vía recta a velocidad constante y necesita 8 segundos para recorrer una distancia de 20 metros. Encuentre su velocidad.

Solución. Aquí la distancia $d = 20$ m y el intervalo de tiempo $t = 8$ seg, la velocidad será:

$$v = \frac{20 \text{ m}}{8 \text{ seg}} = 2.5 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

La respuesta es 2.5 m/seg. Para cambiar esta respuesta a centímetros por segundo, la unidad 1 metro que está en el numerador, se cambia por 100 cm, que es su equivalencia, y el resultado será:

$$v = 2.5 \frac{\text{m}}{\text{seg}} = 2.5 \frac{100 \text{ cm}}{\text{seg}} = 250 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

2.2 Distancia recorrida. Si se conoce la velocidad de un cuerpo, se puede calcular la distancia recorrida en un tiempo dado. Para estos problemas se modifica la ecuación (2b) despejando d . Multiplicando los dos miembros de la ecuación por t , no se altera la igualdad.

$$vt = \frac{dt}{t}$$

Suprimiendo las t del segundo miembro de la ecuación, obtenemos $vt = d$, o sea,

$$d = vt \quad (2f)$$

Ejemplo 3. Si un cuerpo se mueve con velocidad de 45 m/seg, ¿a dónde llegará en 2 min?

Solución. Usando la ecuación (2f), obtenemos

$$d = 45 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 2 \text{ min} = 90 \frac{\text{cm min}}{\text{seg}}$$

Para eliminar las unidades de tiempo en esta respuesta, deberán expresarse tiempos en las mismas unidades. Para ello se pueden cambiar los minutos a segundos, como sigue:

$$d = 45 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 120 \text{ seg} = 5\,400 \text{ cm}$$

Nótese que los *seg* del numerador se anulan con los *seg* del denominador, dejando *cm* en la respuesta como unidades de longitud. Esto nos ilustra una regla corriente que se sigue, generalmente, al resolver todos los problemas. Las cantidades semejantes se expresan en las mismas unidades.

Dividiendo los dos miembros de la ecuación (2f), por v y suprimiendo las v en el segundo miembro de la ecuación, nos queda

$$t = \frac{d}{v} \quad (2g)$$

Una ecuación para obtener el tiempo del viaje en función de la distancia recorrida y de la velocidad.

Ejemplo 4. Si un automóvil viaja con velocidad media de 30 km/hora, ¿cuánto tardará en recorrer 175 km?

Solución. Usando la ecuación (2g), obtenemos

$$t = \frac{d}{v} = \frac{175 \text{ km}}{30 \text{ km/hora}} = 5.83 \text{ horas}$$

2.3 Vectoriales y escalares. Casi todos los resultados de las medidas físicas pueden clasificarse en cantidades *vectoriales* y *escalares*, sin importar la sencillez o complejidad de los aparatos con que se tomaron las lecturas. Las cantidades medibles que tienen magnitud y dirección son llamadas *vectoriales*. Ejemplo de cantidades vectoriales son *desplazamiento*, *velocidad*, *aceleración* y *fuerza*. Las cantidades mensurables que tienen magnitud solamente, se llaman *escalares*. Como ejemplos de cantidades escalares, están el *volumen*, el *área*, la *densidad* y la *masa*.

La importancia de esta distinción aparentemente trivial, entre cantidades que tie-

nen dirección y cantidades que no la tienen, se apreciará al resolver algunos problemas, en que haya que efectuar la adición de dos o más cantidades semejantes.

Con las cantidades escalares no se encuentra dificultad, ya que tales cantidades se suman algebraicamente. Por ejemplo, al sumar dos litros y tres litros, resultan cinco litros. Por otra parte, la adición de dos vectores, es más complicada y requiere un proceso especial llamado *composición de vectores*, que será tratado detalladamente en el Capítulo 5.

2.4 Rapidez y velocidad. Los términos *rapidez* y *velocidad*, se usan con frecuencia como sinónimos. Hablando estrictamente, la *rapidez* es una cantidad escalar y la *velocidad* una cantidad vectorial. Fue explicado, en la sección anterior, que las cantidades vectoriales tienen magnitud y dirección, mientras que las escalares sólo tienen magnitud.

La rapidez es el término aplicado sólo a la magnitud de la velocidad, y no especifica la dirección del movimiento. Al moverse a lo largo de una línea recta, los valores numéricos de la *rapidez* y la *velocidad*, son iguales. Pero si la rapidez a lo largo de una trayectoria curva es constante, la velocidad no se considera uniforme, debido a que va cambiando de dirección.

Cuando se mueve un cuerpo con rapidez constante a lo largo de una línea recta, cuya dirección es definida, se acostumbra a hablar de su *velocidad*. Al moverse a lo largo de una trayectoria recta o curva de la cual no se ha fijado dirección, lo correc-

to es hablar de su *rapidez*. La rapidez y la velocidad tienen las *dimensiones de longitud dividida por tiempo*.

Ejemplo 5. Convertir 30 millas/h en kilómetros por hora.

Solución. En la tabla, vemos que 1 milla/h de la columna izquierda es (leyendo horizontalmente hasta la cuarta columna) igual a 1.6093 km/h, por lo tanto,

$$30 \times 1.6093 = 48.279 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Redondeando la respuesta a tres cifras significativas, será

$$30 \frac{\text{mi}}{\text{h}} = 48.3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

El *nudo* es una unidad náutica de rapidez, cerca de un 85% mayor que la rapidez expresada en kilómetros por hora. No es correcto decir que la rapidez de un barco es de 10 nudos/hora. Lo correcto es decir que su rapidez es de 10 nudos.

2.5 Aceleración uniforme. Siempre que la rapidez o la velocidad de un cuerpo cambian, el movimiento se describe como movimiento acelerado. La *aceleración* se define como la *rapidez con que cambia la velocidad*. Un automóvil "ganando" velocidad, tiene una *aceleración positiva*, mientras que otro que va "perdiendo" velocidad, tiene una *aceleración negativa*. Un automóvil estacionado o moviéndose con velocidad constante, no tiene aceleración.

Considérese la fig. 2B que ilustra el movimiento uniformemente acelerado de un

automóvil. Debido a que la fuerza constantemente ejercida por el motor a través de la transmisión actúa sin interrupción, el vehículo es acelerado constantemente al moverse a lo largo de la línea AB. Al pasar por A, tiene una velocidad relativamente baja v_0 , mientras que, al avanzar en la trayectoria hasta el punto B, ya se va movien-

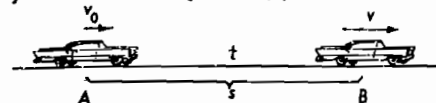


Fig. 2B. Un automóvil acelerado durante t segundos.

do más aprisa y tiene una velocidad v . La *velocidad inicial* es llamada v_0 y la *velocidad final*, v .

Si el tiempo necesario para ir de A a B es t segundos, por la definición arriba mencionada, la aceleración se expresará normalmente de la siguiente manera.

$$\text{aceleración} = \frac{\text{vel. final} - \text{vel. inicial}}{\text{tiempo}}$$

o algebraicamente como

$$a = \frac{v - v_0}{t} \quad (2h)$$

Ejemplo 6. Supongamos que en A, de la fig. 2B, la velocidad del automóvil es de 20 m/seg, que en B ha aumentado hasta



Fig. 2C. El automóvil acelerado del ejemplo 6.

40 m/seg y que necesitó cuatro segundos para ir desde A hasta B. ¿Qué aceleración tiene?

Solución. Sustituyendo directamente en la ecuación (2h), obtenemos,

$$a = \frac{40 \text{ m/seg} - 20 \text{ m/seg}}{4 \text{ seg}} = \frac{20 \text{ m/seg}}{4 \text{ seg}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{seg seg}}$$

La respuesta es *cinco metros por segundo, por segundo*, y significa que la velocidad aumenta 5 m/seg en cada segundo de tiempo. Inicialmente la velocidad era de 20 m/seg. Un aumento de 5 m/seg, significa que después de un segundo, la velocidad será 25 m/seg; al cabo de dos segundos, es de 30 m/seg; al final de 3 segundos, es de 35 m/seg, y pasados 4 segundos es de 40 m/seg (véase la fig 2C). Una *aceleración constante* es, pues, aquella en que el *cambio de la velocidad tiene valores iguales en cada segundo*.

Cuando un cuerpo va deteniéndose, la velocidad inicial es mayor que la velocidad final y, por lo tanto, la aceleración dada por la ecuación (2h), es negativa.

Ejemplo 7. Al subir una loma, un automóvil disminuye de velocidad desde 60 km/h a 30 km/h en 2 min. Encuéntrese la aceleración.

Solución. Sustituyendo en la ecuación (2h), obtenemos,

$$a = \frac{30 \text{ km/h} - 60 \text{ km/h}}{2 \text{ min}} = -15 \frac{\text{km}}{\text{h min}}$$

Entonces, la velocidad disminuye 15 km/h cada minuto. Durante el primer minuto baja de 60 km/h a 45 km/h, y en el segundo minuto, desciende de 45 km/h a 30 km/h.

2.6 Movimiento a partir del reposo. Cuando un cuerpo empieza a moverse partiendo del reposo y sufre una *aceleración*

constante, la velocidad inicial v_0 , dada en la ecuación (2h), es cero; es decir, $v_0 = 0$, entonces la aceleración a puede obtenerse por esta ecuación más breve.

$$a = \frac{v}{t} \quad (2i)$$

TABLA 2A. FACTORES DE CONVERSIÓN DE RAPIDEZ Y VELOCIDAD

Velocidad	m/seg	pie/seg	km/h	mi/h	nudos
1 m/seg =	1	3.281	3.600	2.240	1.940
1 pie/seg =	0.30480	1	1.0973	0.6818	0.5921
1 km/h =	0.27778	0.9113	1	0.6214	0.5396
1 milla/h =	0.44704	1.4667	1.6093	1	0.8684
1 nudo =	0.51480	1.689	1.853	1.152	1

Despejando la velocidad, toma esta forma

$$v = at \quad (2j)$$

Ejemplo 8. Un aeroplano que parte del punto de reposo en un extremo de la pista, adquiere su velocidad de arranque de 100 km/h en 8 seg. ¿Qué aceleración tiene?

Solución. Aplicando la ecuación (2i), obtenemos,

$$a = \frac{100 \text{ km/h}}{8 \text{ seg}} = 12.5 \frac{\text{km}}{\text{h seg}}$$

La respuesta es 12.5 kilómetros por hora por segundo.

2.7 Aceleración de caída por un plano inclinado. Puede hacerse con un plano inclinado un estudio de la aceleración, y la comprobación experimental de las fórmulas dadas anteriormente. En la fig. 2D se representa una bola rodando por una ranura desde la parte alta de un largo plano inclinado. Conforme la bola baja con una rapidez continuamente creciente, se anota su posición a cada oscilación de un *metró-nomo* o *reloj de péndulo*. En el experimento

representado aquí, el ángulo del plano se ha ajustado de manera que la distancia recorrida en el primer segundo sea de 20 cm. Después de 2 segundos, habrá recorrido una distancia total que resulta ser de 80 cm. En tres segundos recorre 180 cm, etc. Al tabular estas mediciones para los primeros cinco segundos, se obtienen las dos primeras columnas de la tabla 2B.

Para encontrar la velocidad obtenida al final de cada segundo, se coloca un corto riel horizontal, en las posiciones uno, dos, tres, cuatro, etc., sucesivamente. En cada una de estas posiciones se mide la distancia recorrida sobre el riel horizontal en un segundo, y esto nos da una medida directa de la velocidad adquirida en el plano inclinado. Así encontramos que después de un segundo, la velocidad es de 40 cm/seg; después de 2 seg; la velocidad es de 80 cm/seg, etc. Estos valores, medidos experimentalmente, aparecen tabulados en la columna 3 de la tabla.

Un estudio cuidadoso de las columnas primera y tercera, demuestran que la velo-

TABLA 2B. VALORES CALCULADOS Y EXPERIMENTALES DETERMINADOS EN EL EXPERIMENTO DEL PLANO INCLINADO DE LA FIG. 2D.

Tiempo t seg	Distancia d cm	Velocidad v cm/seg	$\frac{v}{t}$	at	$\frac{d}{t^2}$	t^2	$\frac{1}{2}at^2$
0	0	0	—	0	—	0	0
1	20	40	40	40	20	1	20
2	80	80	40	80	20	4	80
3	180	120	40	120	20	9	180
4	320	160	40	160	20	16	320
5	500	200	40	200	20	25	500

cidad v es directamente proporcional al tiempo t .

$$v \propto t.$$

Para escribirlo en forma de ecuación algebraica, se reemplaza el signo de proporcionalidad por una igualdad y una constante k .

$$v = kt. \quad (2k)$$

El valor de k puede determinarse, del experimento anterior, en la forma siguiente. Divídase cada valor de v , de la tercera columna, por el valor correspondiente de t , de la primera columna, y se obtendrá 40 cm/seg² como resultado común.

Por tanto, $k = 40 \text{ cm/seg}^2$ y

$$v = 40t \quad (2l)$$

Refiriéndonos a la ec. (2j), se ve que la constante 40 no es otra cosa que la *aceleración*. En otras palabras, es el aumento de velocidad en cada segundo. Cada segundo,

la bola aumenta su velocidad en 40 cm/seg. Reemplazando este 40 en la ecuación (2i) por a , obtenemos

$$v = at$$

que es la ecuación (2j).

Para encontrar la relación que da la distancia recorrida a lo largo del plano inclinado, se observa que d , en la segunda columna, es proporcional al cuadrado de t anotado en la séptima columna.

$$d \propto t^2, \text{ ó } d = kt^2$$

Para encontrar la constante de proporcionalidad k , cada distancia d , se divide entre el valor correspondiente de t^2 , dando 20, como lo muestra la columna 6. Ya que esto es justamente la mitad de la aceleración, podemos escribir $\frac{1}{2}a$ como el valor de la constante k , y obtener

$$d = \frac{1}{2}at^2 \quad (2m)$$

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente los siguientes términos: a) velocidad, b) rapidez, c) aceleración, d) vector, e) escalar, f) aceleración negativa y g) nudo.

2. Definir los términos: a) vector y b) escalar, y explicar su diferencia brevemente. Dar un ejemplo de cada uno.

3. Explicar brevemente la diferencia que hay entre rapidez y velocidad.

4. Hacer un diagrama y explicar brevemente el experimento del plano inclinado.

¿Qué cantidades se miden en este experimento y qué relaciones se derivan de él?

5. Un avión vuela 420 mi en 1 hora 20 minutos. Encontrar su rapidez media. (Resp. 315 mi/h.)

6. Un tren hace un viaje de Nueva York a Chicago, una distancia de 900 mi, en 18 horas. Encontrar su rapidez media.

7. Un vehículo viaja 146 mi en 3 h, 45 minutos. Encontrar su rapidez media. (Resp. 38.9 mi/h.)

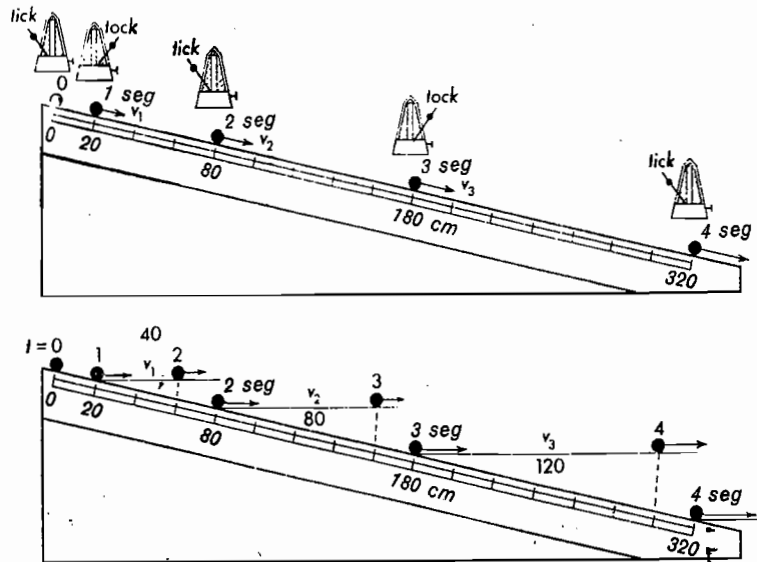


Fig. 2D. Experimento de un plano inclinado, indicando las distancias recorridas cada segundo por una bola al descender rodando por el plano.

8. Un barco viaja a 18 nudos hacia el Este durante 16 h. ¿Cuántas millas ha recorrido?

9. Un auto de carreras viaja a 240 mi/h en una pista recta y a nivel. ¿Cuál es su rapidez equivalente en km/h? (Resp. 386.2 km/h.)

10. Si un barco tiene una rapidez de 32 nudos, ¿cuál es su rapidez en mi/h?

11. Un barco tiene una rapidez de 26 nudos, ¿cuál es su rapidez en km/h? (Resp. 48.2 km/h.)

12. Un aerotransporte 707 jet tiene una rapidez de 600 mi/h, ¿cuántos pies viaja en un segundo?

13. ¿Cuánto tardará un avión jet viajando a 580 mi/h para viajar de San Francisco a Hawai, una distancia de 2 200 mi? (Resp. 3.79 h.)

14. ¿Cuánto tardará un auto a 45 mi/h en viajar una distancia de 3 000 mi?

15. ¿Cuánto tardará un hombre en caminar 12 mi si su rapidez media al caminar es de 3.2 mi/h? (Resp. 3 h, 45 min.)

16. Un avión jet partiendo del reposo en el extremo de la pista adquiere su velocidad de despegue de 180 mi/h en 60 seg. Encontrar su aceleración en ft/seg².

17. Un tren que iba con una rapidez de 5 ft/seg recibe una aceleración constante. Si al final de 2 min tiene una rapidez de 20 ft/seg, ¿cuál ha sido su aceleración? (Resp. 0.125 ft/seg².)

18. Un vehículo que parte del reposo, adquiere una rapidez de 40 mi/h en 20 seg, ¿cuál es su aceleración en ft/seg²?

19. Partiendo del reposo en el extremo de una pista, un avión recibe una aceleración constante de 3.5 ft/seg². Encontrar su velocidad después de 8 seg. (Resp. 28.0 ft/seg.)

20. Un avión de pasajeros, parte del reposo en el extremo de su pista de arranque y mantiene una aceleración constante de 4 ft/seg², ¿cuál será su rapidez al final de 50 seg?

21. Partiendo del reposo, un auto de carreras adquiere una rapidez de 90 mi/hr en 50 seg. Encontrar, a) la aceleración y b) la distancia recorrida. (Resp. a) 2.64 ft/seg²; b) 3 300 ft.)

22. Un bote de motor parte del reposo y adquiere una rapidez de 30 mi/h en 10 seg. Encontrar, a) la aceleración y b) la distancia recorrida durante este tiempo.

23. A un auto, viajando a 60 mi/hr, se le aplican los frenos y se hace quedar en reposo en 5 seg. Encontrar, a) la aceleración y b) la distancia recorrida. (Resp. a) -17.6 ft/seg²; b) 220 ft.)

24. A un tren, que va viajando a 45 mi/h, se le aplican los frenos y se detiene en 1 min, 20 seg. Encontrar, a) la aceleración y b) la distancia recorrida.

25. Se cae una caja de un camión mientras éste viaja a 60 mi/h. Si la caja se desliza por el pavimento y acaba por pararse a los 8 seg, ¿cuál es, a) la aceleración y b) la distancia deslizada? (Resp. a) -11 ft/seg²; b) 352 ft.)

3

LEYES DEL MOVIMIENTO DE NEWTON

En el capítulo anterior se describieron los movimientos de los cuerpos en función de su *rapidez*, su *velocidad* y su *aceleración*. Las definiciones de esas magnitudes, las leyes y ecuaciones que las relacionan, se clasifican dentro de la parte de la mecánica llamada *cinemática*. En este capítulo se va a estudiar la causa del movimiento. Para ello se requiere la introducción de los conceptos de *masa* y de *fuerza* y su aplicación en las ecuaciones ya presentadas.

Corresponde a Isaac Newton * el mérito de haber sido el primero que introdujo sistemáticamente estos conceptos en la mecánica y formuló las leyes que gobiernan el

movimiento. Éstas constituyen los principios fundamentales de la rama de la mecánica llamada *dinámica*, y se establecen en tres leyes conocidas generalmente como las *leyes del movimiento de Newton*.

3.1 Primera Ley del Movimiento de Newton. *Un cuerpo en reposo o con movimiento uniforme, seguirá en reposo o con movimiento uniforme, a menos que actúe sobre él una fuerza externa.*† Esta ley se puede demostrar por muchos experimentos sencillos. En la fig. 3A, se representa el proceso de quitar el mantel de la mesa por debajo de la vajilla y los cubiertos, sin trastornar su colocación. En la fig. 3B, se ilustra un carro en libertad de moverse sobre una vía rígida y lisa. Si los rieles son movidos rápidamente hacia la derecha o la izquierda, las ruedas del carro girarán, pero el carro en sí tenderá a seguir en reposo.

En ambos experimentos, la vajilla y el carro están en reposo. Tienden a seguir en reposo porque el movimiento brusco de los objetos sobre los que están apoyados, no ejerce una fuerza grande durante un tiempo apreciable. En realidad, la vajilla y el carro se mueven ligeramente debido a las pequeñas fuerzas de fricción que hay entre las partes móviles en contacto. La tendencia de todo objeto a seguir en reposo, se debe a esa propiedad, común a todos los cuerpos materiales, llamada *inercia*. La *inercia de un cuerpo puede definirse como*

* Isaac Newton (1642-1727), físico y matemático inglés, nació el día de Navidad de 1642. Hizo sus estudios en el Colegio de la Trinidad en Cambridge, donde en 1665 recibió el título de Maestro en Arte. Poco después la peste negra lo obligó a retirarse a su vieja casa en Woolsthorpe, donde se desarrolló su genio en los años de 1665 y 1666. En este período, inventó el cálculo, descubrió la composición de la luz blanca y concibió la idea de la gravitación universal. En los años siguientes, publicó muchos de sus trabajos de óptica y desarrolló sus ideas sobre la gravitación, que fueron publicadas en 1687 en su libro *Principia*. A la edad de 50 años sufrió un colapso nervioso y nunca volvió a hacer trabajos científicos extensos, pero se dedicó a la Teología. Se volvió muy distraído y descuidado de su apariencia personal. Su libro *Principia* es considerado uno de los más grandes monumentos del intelecto humano. Newton establece en él las bases de la mecánica, que han sido suficientemente amplias para contener todos sus futuros desenvolvimientos, y aplica la mecánica a los movimientos de los cuerpos celestes bajo las leyes de gravitación. Fue elegido miembro del Parlamento, fue presidente de la Real Sociedad Británica durante 25 años, en 1705 fue armado caballero por la Reina Ana. La grandeza de este hombre modesto se ilustra por una frase que dijo en su lecho de muerte: "Si yo he visto más lejos que otros, ha sido porque pude apoyarme sobre los hombros de gigantes."

† La primera Ley del Movimiento de Newton viene dada en latín en su famoso libro *Principia*: *Lex I. Corpus omne præservare in statu suo quiescenti vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus illud a viribus impressis cogitur statum suum mutare.*

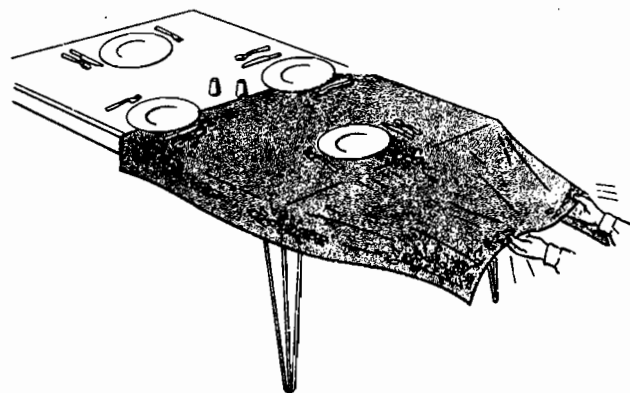


Fig. 3A. Se puede sacar el mantel sin mover la vajilla y los cubiertos.

aquella propiedad del cuerpo que tiende a oponerse a cualquier cambio de su estado de reposo o de movimiento. La masa se define como la medida cuantitativa de la inercia. En el sistema métrico, la masa se mide en gramos o kilogramos.

Un tercer experimento, que comprueba la inercia, y la primera ley de Newton, está representado en la fig. 3C. Una pequeña masa M de 1 000 gramos se suspende por un hilo delgado A, luego se tira hacia abajo, mediante otro pedazo B del mismo hilo. Si la fuerza F es de acción lenta y continua, el hilo se romperá en A; mientras que si es un estiramiento brusco, siempre se romperá en B. En el primer caso, la tensión sufrida por la cuerda de arriba, es mayor y equivale a la fuerza F más el peso de la

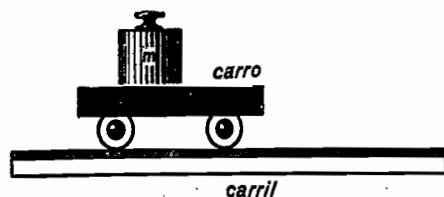


Fig. 3B. Se pueden mover rápidamente los carriles sin conseguir que se mueva el vehículo.

masa M . En el segundo caso, la fuerza F es muy grande, momentáneamente, y hace que se rompa el hilo antes de que la masa M haya tenido tiempo de moverse hacia

abajo lo suficiente para estirar y romper el hilo superior. Lo que permite que se aplique, por un instante, la fuerza F sólo al hilo de abajo, es la inercia de M .

Si al carro de la fig. 3B se le hace que empiece a rodar a lo largo de los rieles, la primera ley de Newton establece que debe seguirse moviendo con la misma velocidad. Por supuesto que la ley desprecia la fricción, pues nosotros sabemos que si se deja actuar al rozamiento, éste hará que se de-

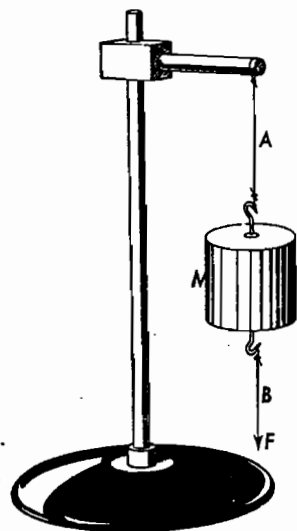


Fig. 3C. Un tirón brusco en F rompe el hilo en B; un tirón lento y continuo, lo rompe en A.

tenga el carro. Cuanto mayor es la fricción, más pronto se parará. Cuanto menos rozamiento haya, más tiempo seguirá moviéndose. Si se pudiera eliminar completamente la fricción, la inercia del carro lo mantendría moviéndose indefinidamente y con velocidad constante.

3.2 Segunda Ley del Movimiento de Newton. La primera ley de Newton que se ocupa de los cuerpos en reposo, o que se están moviendo con velocidad constante, supone que no actúa ninguna fuerza para cambiar el estado del cuerpo. En cambio la segunda ley de Newton, considera que sí está actuando esta fuerza, y describe el cambio de movimiento que produce. En la fig. 3D,

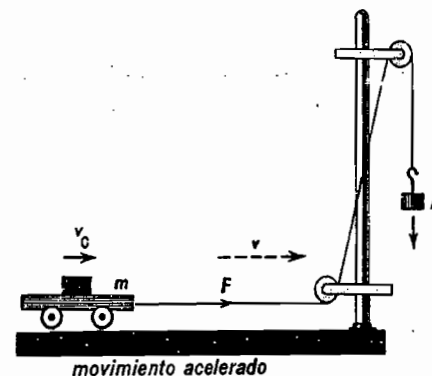


Fig. 3D. Un vehículo pequeño siendo acelerado por una fuerza constante.

por ejemplo, un carro pequeño de masa m se somete a la acción de una fuerza constante F . La fuerza es producida por la atracción de la gravedad sobre la masa M y es transmitida al carro por un cordel que pasa por unas poleas. Si el carro está inicialmente en reposo, esta fuerza lo pondrá en movimiento; si ya se estaba moviendo con una velocidad v_0 , la fuerza aumentará su velocidad, o sea, que el carro será acelerado.

La segunda ley del movimiento de Newton,* puede establecerse como sigue: Cuan-

* La Segunda Ley del Movimiento de Newton se establece en latín en su Principia: *Lex II. Mutationem motus, proportionalem esse vi motrici impressæ, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimatur.*

do se aplica una fuerza constante a un cuerpo, la aceleración que resulta, es proporcional a la fuerza y es inversamente proporcional a la masa. Simbólicamente,

$$a \propto \frac{F}{m}$$

Esta ley se establece como una proporción, porque es válida sin importar qué unidades se usen para las tres cantidades que intervienen. Si se escogen las unidades apropiadas, se puede poner un signo de igualdad en vez de la proporción, y escribirlo como ecuación,

$$a = \frac{F}{m}$$

Pasando la m al primer miembro de la ecuación, se obtiene la llamada *ecuación de la fuerza*, que sirve de base a muchos principios de mecánica (3a).

$$F = ma$$

fuerza = masa \times aceleración (3a)

A la segunda ley de Newton debe agregarse que la *aceleración tiene la misma dirección que la fuerza que actúa*.

Ejemplo 1. Despreciando la fricción, ¿qué fuerza constante se necesitará para producir una aceleración de 5 cm/seg^2 a una masa de 50 g ?

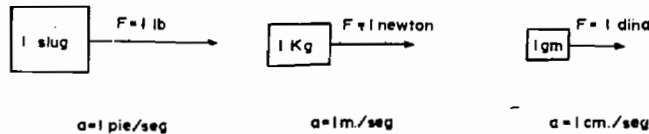
Solución. Sustituyendo directamente en la ecuación de la fuerza (3a), obtenemos

$$F = 50 \text{ g} \times 5 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} = 250 \frac{\text{g cm}}{\text{seg}^2}$$

La respuesta es una fuerza de 250 g cm/seg^2 .

Se ve que la fuerza no es un concepto simple, como puede parecer a primera vista; comprende tres unidades fundamentales; *longitud, masa y tiempo*.

Por definición, un gramo cm/seg^2 es la unidad de fuerza llamada *dina*. Conforme a esta definición, la respuesta del problema anterior, puede escribirse como 250 dinas . La *dina* es una fuerza que, aplicada a una



masa de 1 gramo, le produce una aceleración de 1 cm/seg². En el sistema CGS (centímetro, gramo, segundo), las unidades de la ecuación (3a), serán

$$1 \text{ dina} = 1 \text{ g} \times 1 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2}$$

Hay una preferencia creciente entre los científicos y los profesores de física, por el uso del kilogramo y el metro en lugar del gramo y el centímetro como unidades de masa y longitud. Conforme al sistema MKS (metro, kilogramo, segundo), la unidad de fuerza es llamada newton en honor a Sir Isaac Newton. El newton se define como la fuerza que, al aplicarse a una masa de 1 kilogramo, le produce una aceleración de 1 m/seg².

En el sistema MKS de unidades, la ecuación (3a), se convierte en

$$1 \text{ newton} = 1 \text{ kg} \times 1 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \quad (3b)$$

Ejemplo 2. Determinar qué fuerza constante en newtons, aplicada a una masa de cuatro kilogramos, produce una aceleración de 3.8 m/seg². Despreciar la fricción.

Solución. Aplicando la ecuación de la fuerza, $F = ma$, obtenemos

$$F = 4 \text{ kg} \times 3.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} = 15.2 \frac{\text{kg m}}{\text{seg}^2} = 15.2 \text{ newtons}$$

La respuesta es una fuerza constante de 15.2 newtons.

La dina y el newton son unidades absolutas de fuerza. Se obtienen de la ecuación de la fuerza cuando son usadas las unidades absolutas de masa y de tiempo, como lo hicimos antes.

Ya que un kilogramo = 1 000 gramos, y un metro = 100 centímetros,

$$1 \text{ newton} = 100\,000 \text{ dinas.}$$

3.3 El sistema de unidades para ingeniería. Los ingenieros de los países de habla inglesa y de otros países que importan maquinaria producida allá, usan con frecuencia otro sistema distinto que el métrico, en el cual se miden las fuerzas en libras. Para aplicar la Segunda Ley del Movimiento de Newton expresada por la ecuación de la fuerza $F = ma$, se necesita introducir una unidad de masa llamada el slug. Ver la figura 3E. Un slug se define como la masa que, por la acción de una fuerza de 1 lb, recibe una aceleración de 1 ft/seg².

$$1 \text{ lb} = 1 \text{ slug} \times 1 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}. \quad (3c)$$

La masa de un cuerpo en slugs puede obtenerse dividiendo su peso en libras entre 32.

Veremos en la Sec. 4.3 que el número 32 se deriva de la aceleración de los cuerpos en caída libre.

La diferencia entre la masa y el peso de un objeto se tratará en detalle en la Sección 6.1.

Ejemplo 3. ¿Qué fuerza horizontal en libras producirá una aceleración de 6 ft/seg² a un pequeño carro que pese 176 libras?

Solución. Aplicando la segunda ley de Newton, la ecuación (3a), obtenemos,

$$F = \frac{176}{32} \text{ slugs} \times 6 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}$$

$$F = 5.5 \text{ slugs} \times 6 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2} = 33 \text{ lb}$$

La respuesta es: Una fuerza constante de 33 lbs.

Para ilustrar lo digna de confianza que es siempre la segunda ley de Newton, considérese la siguiente paradoja. Se coloca un carrito de hilo sobre una mesa, como se indica en la fig. 3F, con el hilo saliendo

de la parte de abajo del carrito. Si se aplica una fuerza F , se hará que se mueva el carrito. ¿Para dónde rodará? ¿Hacia la derecha, enrollando el hilo, o hacia la izquierda,

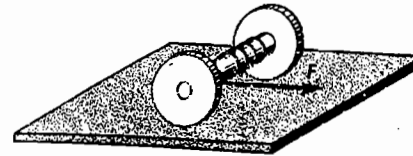


Fig. 3F. Al tirar del hilo hacia la derecha, ¿para dónde rueda el carrito, a la derecha o la izquierda?

da, desenrollándolo? Se le deja al estudiante como problema, para que ejecute este experimento y explique el resultado.

3.4 Tercera Ley del Movimiento de Newton. De las tres leyes del movimiento de Newton, quizá la tercera es la menos comprendida. Esto se debe probablemente al hecho de que se usa poco para resolver problemas, y frecuentemente se aplica en forma incorrecta. Esta ley establece que, a toda fuerza de acción se opone una fuerza igual y opuesta de reacción.*

El principio de la acción y la reacción se puede ilustrar mediante un bate de béisbol pegando a la pelota, fig. 3G. Durante el impacto, el bate ejerce una fuerza F sobre la pelota y ésta ejerce una fuerza G igual y opuesta actuando sobre el bate.

La fuerza F que está ejerciéndose sobre la pelota, le produce a ésta una aceleración hacia la derecha, mientras que la fuerza G que se ejerce sobre el bate, le produce a éste una aceleración hacia la izquierda. La pelota se acelera durante el impacto y adquiere una gran velocidad, mientras que en ese mismo espacio de tiempo, el bate se retarda reduciendo su velocidad.

Considerando el segundo ejemplo, un trozo de madera colgando de una cuerda,

como se ilustra en la fig. 3H, el peso del trozo de madera W es la fuerza con que la Tierra lo atrae hacia abajo, mientras que la fuerza igual y contraria X , es la

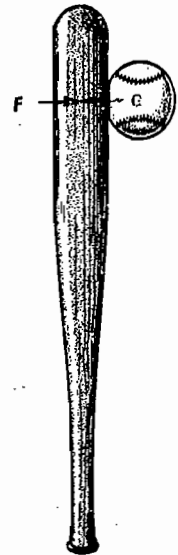


Fig. 3G. El bate siempre ejerce en la pelota una fuerza igual en magnitud y contraria en dirección a la fuerza que ejerce la pelota sobre el bate.

fuerza hacia arriba ejercida por el trozo de madera actuando sobre la Tierra.

Además de este par de fuerzas, el trozo de madera ejerce una fuerza hacia abajo G sobre la cuerda, mientras que la cuerda tira hacia arriba con la fuerza de reacción F . Estas fuerzas pueden causar con-

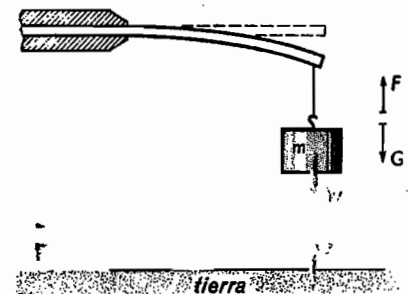


Fig. 3H. Tercera ley del movimiento de Newton. Las fuerzas existen siempre por pares.

* La Tercera Ley de Newton, como se publicó en latín en su Principia es: *Lex III. Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem; sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.*

fusión a muchas personas; pero, para su tranquilidad, debe hacerse notar que el mismo Newton tuvo algunas dificultades al aplicar su tercera ley a determinados problemas. La dificultad viene de que muchas veces se intenta la aplicación de las fuerzas de acción y reacción al mismo cuerpo, cuando realmente se deben aplicar a cuerpos diferentes. Es importante notar que la fuerza de acción y la fuerza de reacción de la tercera ley de Newton, actúan sobre cuerpos diferentes.

El estado de un cuerpo, ya esté en reposo o en movimiento, depende de las fuerzas que actúan sobre este cuerpo, y no de las fuerzas ejercidas por él sobre otros cuerpos. Por lo que respecta al cuerpo en estudio, estas últimas fuerzas no influyen en su movimiento.

3.5 El experimento del tren y la vía. El experimento del tren y la vía, es otra ilustración de la tercera ley de Newton. Las ruedas motrices del tren, empujan hacia atrás a los rieles con la fuerza B , y éstos empujan hacia adelante a las ruedas con la fuerza igual y opuesta F . Estas dos forman un par de acción y reacción. El experimento del tren y la vía se desarrolló para demostrar que existen ambas fuerzas.

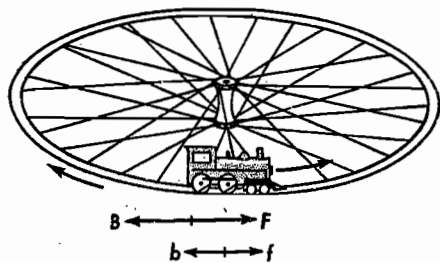


Fig. 31. Tercera ley de Newton. Al avanzar el tren, los rieles retroceden, si están en libertad de hacerlo.

En la fig. 31, los rieles están montados en una gran rueda con su eje de rotación en posición vertical. Teniendo libertad de moverse los rieles, ambas fuerzas parecen muy reales. Los rieles se mueven hacia atrás y el tren hacia adelante. Los rieles se mueven hacia atrás, porque las ruedas ejercen sobre ellos una fuerza B en esa dirección, y el tren se mueve hacia adelante, porque los rieles ejercen sobre él una fuerza en dirección opuesta. Si se corta la fuente de energía cuando el tren tiene cierta velocidad, la fuerza F desaparece (lo mismo que la B) y el tren y los rieles siguen moviéndose con rapidez constante.

En la práctica nos encontramos con que los rieles no sólo están fijos contra el suelo, sino que además hay cierta resistencia de fricción que se opone al movimiento. Debido a esta fricción, los rieles empujan hacia atrás a las ruedas con una fuerza b , y las ruedas empujan hacia adelante a los rieles, con una fuerza igual pero opuesta f .

A fin de mantener en movimiento al tren con rapidez constante, se debe proporcionar a las ruedas motrices de la locomotora, una fuerza B mínima, pero suficientemente grande para equilibrar la fricción. Las dos fuerzas que actúan sobre el tren serán, entonces, F y b , y si son iguales y opuestas, tendrán una resultante cero. No habiendo fuerza resultante, no habrá aceleración y el tren seguirá moviéndose con velocidad constante.

F debe ser mayor que b para tener una aceleración al iniciar el movimiento del tren. Bajo esas condiciones, por la segunda Ley de Newton, tenemos

$$F - b = ma$$

$$\text{fuerza} = \text{masa} \times \text{aceleración}$$

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Expresar la primera ley del movimiento de Newton y describir un experimento que pueda ilustrar esta ley.

2. Expresar la segunda ley del movimiento de Newton. Escribir la ecuación algebraica

que representa esta ley y señalar el significado de cada símbolo usado.

3. Expresar la tercera ley de Newton. Dar un ejemplo, explicado brevemente, en función de las fuerzas que intervienen.

4. Definir o explicar brevemente los siguientes términos: a) newton, b) dina, c) slug, d) inercia y e) masa.

5. Una masa de 5 kilogramos recibe una aceleración de 3.4 m/seg^2 . Calcular la fuerza necesaria a) en newtons y b) en dinas. (Resp. a) 17.0 newtons, b) 1 700 000 dinas.)

6. Una masa de 680 gramos recibe una aceleración de 43 cm/seg^2 . Encontrar la fuerza aplicada a) en dinas y b) en newtons.

7. Un carro que pesa 4 800 lb puede acelerarse a 1.8 ft/seg^2 . Encontrar la fuerza impulsora efectiva en libras. (Resp. 270 lb.)

8. Una fuerza de 260 lb se aplica a un carro que pesa 4 000 lb. Encontrar a) la masa del carro en slugs y b) la aceleración.

9. Un avión de pasajeros que pesa 1 000 toneladas cortas es capaz de acelerarse 2.4 ft/seg^2 . Calcular a) la masa del avión en slugs y b) la fuerza que desarrolla en libras. (Resp. a) 62 500 slugs, b) 150 000 lb.)

10. Un auto de carreras tiene una masa de 1 600 kg. ¿Qué fuerza le dará una aceleración de 0.5 m/seg^2 ?

11. Una fuerza de 12 newtons actúa sobre una masa de 7.8 kg. Encontrar la aceleración. (Resp. 1.54 m/seg^2 .)

12. Se deja caer libremente una masa de 64 kg bajo la atracción de la gravedad. Encontrar la aceleración.

13. Un tren de 2 000 ton (cortas) parte del reposo y adquiere una rapidez de 60 mi/h en 4 min, 30 seg. Calcular a) la aceleración y b) la fuerza ejercida en los rieles por las ruedas motrices. (Resp. a) 0.326 ft/seg^2 , b) 40 740 lb.)

14. Se aplica una fuerza de 25 newtons a una masa de 8 kg. Encontrar a) la aceleración, b) la distancia recorrida en 18 seg y c) la velocidad al final de 12 seg.

15. Se aplica una fuerza de 42 newtons a una masa de 20 kg. Encontrar: a) la aceleración, b) la distancia viajada en 15 seg y c) la velocidad adquirida al final de 24 seg. (Resp. a) 2.1 m/seg^2 , b) 236 m, c) 50.4 metros por seg.)

16. Partiendo del reposo en el extremo de una pista de arranque, un avión de 3 200 ton (cortas) adquiere su velocidad de despegue de 150 mi/h en 70 seg. Encontrar: a) la aceleración, b) el empuje de los motores y c) la distancia recorrida hasta el despegue.

17. Un carro de 4 000 lb parte del reposo y adquiere una rapidez de 60 mi/h en 10 seg. Encontrar: a) la aceleración, b) la fuerza aplicada y c) la distancia recorrida. (Resp. a) 8.8 ft/seg^2 , b) 1 100 lb, c) 440 ft.)

18. Una locomotora que pesa 500 tons (cortas) parte del reposo y adquiere una rapidez de 45 mi/hr en 16 seg. Encontrar: a) la aceleración, b) la fuerza y c) la distancia recorrida.

19. Una fuerza de 250 newtons, aplicada a una masa, le produce una aceleración de 6.25 m/seg^2 . Encontrar: a) la masa, b) la velocidad al final de 8 seg y c) la distancia recorrida en 6 seg. (Resp. a) 40 kg, b) 50 metros/seg, c) 112.5 m.)

20. Una masa de 500 kg sufre una aceleración de 4.8 m/seg^2 durante 12 seg. Encontrar: a) la fuerza aplicada, b) la velocidad obtenida y c) la distancia recorrida.

CAIDA DE CUERPOS, PROYECTILES Y LEY DE LA GRAVITACION DE NEWTON

Todos los cuerpos, grandes o pequeños, caen con la misma aceleración, si despreciamos el rozamiento. Esta ley de la caída de los cuerpos, es una paradoja física porque contradice la conclusión que, en general, obtiene *a priori* cualquier persona. Esto no debe sorprendernos, ya que hace siglos el gran filósofo Aristóteles (384-322 a.C)* enseñaba que los cuerpos pesados caían proporcionalmente más aprisa que los cuerpos ligeros.

Necesitó la humanidad cerca de 2 000 años para que apareciera alguien que refutara las enseñanzas científicas de Aristóteles. En el año 1590, Galileo † se puso a pensar en el problema de los cuerpos que

*Aristóteles (384-322 a. C.), famoso filósofo griego, lógico, moralista, pensador político, biólogo y fundador de la crítica literaria. En su juventud fue discípulo y colaborador de Platón. Aunque actualmente se sabe que casi todas las enseñanzas y principios físicos de Aristóteles fueron erróneas, su contribución en otros campos del conocimiento, lo han colocado muy alto entre los hombres de la antigua Grecia.

† Galileo Galilei (1564-1642), matemático, astrónomo y físico experimental italiano. A la edad de 24 años, Galileo escribió un tratado sobre el centro de gravedad de los sólidos. Esto lo llevó al año siguiente al puesto de profesor de matemáticas en la Universidad de Pisa. Habiéndose enterado de que un holandés, pulidor de lentes, había observado que el uso de dos lentes juntas hacía que los objetos distantes parecieran estar cerca, Galileo construyó el primer telescopio. Mayores y más potentes telescopios, le permitieron observar por primera vez las montañas de la Luna, los satélites más grandes de Júpiter y las manchas del Sol. Estando en Pisa, Galileo efectuó muchos experimentos y demostraciones públicas de los principios que forman la base de la Mecánica y las leyes de los proyectiles y de la caída de los cuerpos.

caían y encontró una contradicción aparente con las enseñanzas de Aristóteles. Se dice que en sus pruebas dejó caer varios objetos desde diferentes niveles de la torre inclinada de Pisa; determinó la duración de la caída y midió las velocidades que alcanzaban.

Se cuenta que, en una ocasión, Galileo había reunido una gran multitud cerca de la torre inclinada, donde subió por las escaleras hasta el campanario y desde una ventana abierta, lanzó dos piedras, una grande y otra pequeña. Estos dos cuerpos cayeron juntos y pegaron en la tierra en el mismo momento, marcando el final de una vieja hipótesis y el nacimiento de una nueva era de la ciencia.

Sea o no verdadero este episodio particular, la importancia de los muchos experimentos auténticos de Galileo, no consiste sólo en el hecho de que demostraron el error del razonamiento aristotélico, sino en que presentaron al mundo un método científico nuevo y más digno de confianza, el método experimental.

4.1 Gravitación. El principio de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración, puede demostrarse de varias maneras. Una de ellas es la ilustrada en la fig. 4A, donde dos esferas de acero, una grande y otra pequeña, se sostienen en un trozo de madera a 4 u 8 metros encima del suelo. Cuando el trozo de madera es desplazado, tirando de la cuerda, las dos esferas caen juntas, y llegan al suelo al mismo tiempo.

CAIDA DE CUERPOS, PROYECTILES Y LEY DE LA...

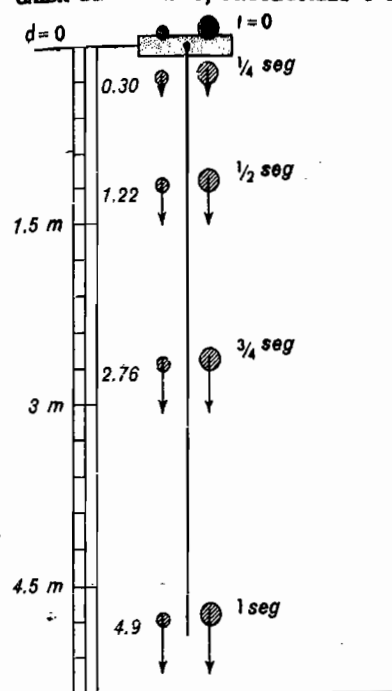


Fig. 4A. Todos los cuerpos que caen libremente por la atracción de la Tierra, caen 4.9 m en el primer segundo.

Cayendo desde una altura de 4.9 metros, tardarán un segundo exactamente en llegar al suelo. Los círculos sombreados de la figura, indican las posiciones de los dos cuerpos después de cada cuarto de segundo.

Si las bolas de este experimento son reemplazadas por dos esferas de igual tamaño, una de acero y otra de madera, las dos caerán juntas y llegarán al suelo también a la vez. En este caso, la esfera de acero pesa 15 veces más que la de madera. (La masa específica del acero, es 7.6 g/cm^3 ; la masa específica de la madera es 0.5 g/cm^3 .)

Generalmente se presenta ya el problema del rozamiento del aire al hacer este último experimento; si se observa con mucho cuidado, se verá que la esfera de madera se atrasa siempre un poquito respecto a la esfera de acero. Este atraso, debido al rozamiento del aire, aumenta al caer de mayor altura, y es más pronunciado aún, cuando

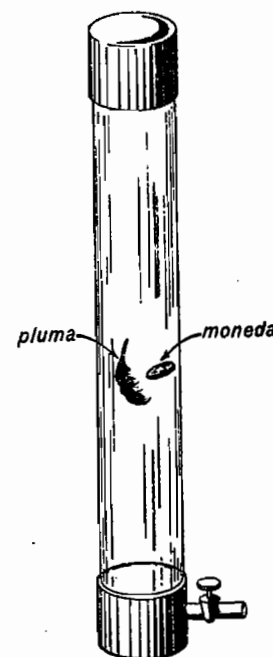


Fig. 4B. Una pluma y una moneda caen con igual aceleración en el vacío y llegan juntas abajo.

se usan objetos más ligeros, una pluma, o una hoja de árbol, cayendo con la esfera de acero. Debido a su gran superficie, la pluma o la hoja caen revoloteando hacia la tierra, detenidas por la gran cantidad de aire que deben empujar hacia los lados para abrirse camino.

En la ausencia de aire, las plumas caerán también con la misma aceleración que la esfera de acero. En la fig. 4B se muestra un experimento para demostrarlo. Un tubo cilíndrico grande contiene una moneda y una pluma, y mediante un tubo de hule se conecta a una bomba de vacío. Si se invierte el tubo de vidrio después de hacer el vacío, la pluma y la moneda caen juntas. Cuando se admite de nuevo aire dentro del cilindro, la pluma volverá a caer revoloteando lentamente hasta el fondo. *En ausencia del rozamiento del aire, todos los cuerpos caen con la misma aceleración.*

En el resto de este capítulo, al tratar de la caída de los cuerpos, se despreciará el

rozamiento del aire. Las ecuaciones que se presenten y usen en los problemas, serán únicamente, por tanto, aproximadas. En la mayoría de los casos reales, los resultados calculados están tan cercanos a los obtenidos experimentalmente, que las correcciones debidas al rozamiento sólo es necesario hacerlas cuando las distancias y las velocidades sean grandes.

4.2 Caída libre. Se pueden hacer muchos experimentos de laboratorio para demostrar las leyes de la caída libre de los cuerpos. Uno de éstos, es el experimento del plano inclinado, descrito en el Capítulo 2. Si se hace que el ángulo que forma el plano con la horizontal aumente, la aceleración de la esfera que baja por el plano irá aumentando también. Las velocidades y las distancias recorridas, aumentarán en las proporciones correspondientes indicando que

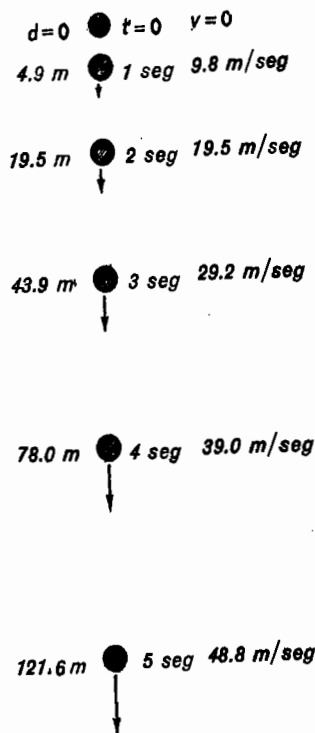


Fig. 4C. Distancias y velocidades en los primeros 5 segundos de caída libre de un cuerpo.

todas las ecuaciones agrupadas al final del Capítulo 2, son válidas en general. Esto es cierto también para el ángulo límite de 90° , cuando el plano inclinado queda completamente vertical y la esfera de acero cae libre bajo la plena acción de la atracción de la gravedad.

Como se indica en la fig. 4C, la distancia a que cae un cuerpo es de 4.9 metros, en el primer segundo; 4 veces esa distancia, o sea 19.6 m, en dos segundos; nueve veces más, o sea 44.1 m, en tres segundos, etcétera. Si ponemos estas distancias en la ecuación (2m), se encuentra la aceleración constante con un valor como de 980 cm por segundo cuadrado.

4.3 La aceleración producida por la gravedad. Los experimentos efectuados en muchos puntos de la superficie terrestre, hacen ver que la aceleración producida por la gravedad no es la misma en todas partes, y está sujeta a ligeras variaciones. Estas variaciones deben tomarse en consideración aunque son pequeñas y no influyen en la mayoría de los problemas prácticos.

Los valores de la aceleración producida por la gravedad, quedan, en general, entre un mínimo de 978.04 cm/seg^2 (32.09 ft/seg^2) en el Ecuador, hasta un máximo de 983.21 cm/seg^2 (32.26 ft/seg^2) en los polos terrestres. Al referirnos aquí al Ecuador y a los polos, estamos generalizando, pues ni en todos los puntos del Ecuador tiene el valor que se indica arriba, ni en todos los puntos de una latitud determinada tiene la aceleración de la gravedad el mismo valor. Las irregularidades de la estructura de la Tierra, producen diferencias pequeñas e irregulares.

El Comité Internacional de Pesas y Medidas ha adoptado como valor normal, 980.665 cm/seg^2 (32.174 ft/seg^2); pero, para usos prácticos se acostumbra usar, en números redondos, 980 cm/seg^2 (32 ft/seg^2). En las fórmulas para la caída libre se emplea la letra g en lugar de la a que se usa en las ecuaciones del Capítulo 2. Para los cuerpos que caen libremente, tenemos entonces

$$g = 980 \text{ cm/seg}^2, \quad g = 9.80 \text{ m/seg}^2$$

$$g = 32 \text{ ft/seg}^2$$

y la ecuación (2j) queda

$$v = gt \quad (4a)$$

mientras que la ecuación (2m) queda

$$d = \frac{1}{2} gt^2 \quad (4b)$$

Ejemplo 1. Un muchacho parado encima de un puente, suelta una piedra hacia el agua del río. Observando su reloj nota que la piedra necesitó 3 seg para caer.

Calcular: a) la velocidad de la piedra al llegar al agua, y b) la altura del puente.

Solución. Para encontrar su velocidad, conviene usar la ecuación (4a) y sustituir las cantidades conocidas, $g = 980 \text{ cm/seg}^2$ y $t = 3 \text{ seg}$.

$$v = 980 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} \times 3 \text{ seg} = 2940 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}$$

Para encontrar la altura, se usa la ec. (4b) y se sustituyen las mismas cantidades como sigue:

$$d = \frac{1}{2} \times 980 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} \times 9 \text{ seg}^2 = 4410 \text{ cm}$$

Las respuestas son: a) la piedra llega al agua con una velocidad de 2940 cm/seg , y b) la altura del puente es de 4410 cm .

4.4 Lanzamiento vertical hacia arriba. Cuando se lanza verticalmente hacia arriba un objeto, su velocidad disminuye rápidamente hasta que, en cierto punto, queda momentáneamente en reposo y después cae otra vez hacia la tierra, adquiriendo de nuevo la misma velocidad con que fue lanzado hacia arriba en el momento que llega de vuelta al suelo. Experimentalmente, se demuestra que el tiempo necesario para subir hasta el punto más alto de su trayectoria, es igual al tiempo que tarda en caer desde allí hasta el suelo. Esto implica que los movimientos hacia arriba son justamente igua-

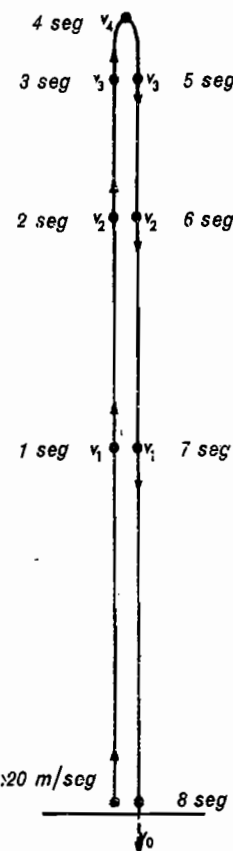


Fig. 4D. El movimiento de subida es igual al de bajada si se desprecia el rozamiento del aire. Una piedra lanzada hacia arriba, vuelve al suelo con la misma velocidad.

les a los movimientos hacia abajo, pero en sentido inverso, y que el tiempo y velocidad en cualquier punto de la trayectoria están dados por las mismas ecuaciones de la caída libre, ecuaciones (4a) y (4b).

En la fig. 4D se muestra una partícula proyectada hacia arriba, con una velocidad inicial de 3920 cm/seg . Se encuentra que, después de cada segundo, la velocidad hacia arriba, o al subir, es la misma que la velocidad hacia abajo, o al regresar al mismo nivel.

Ejemplo 2. Se lanza una bola verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de 3920 cm/seg . Despreciando la fricción, en-

contrar: a) el tiempo necesario para llegar a lo más alto de su vuelo y b) la altura máxima alcanzada.

Solución. Ya que el tiempo de subida es igual al tiempo de bajada, podemos aplicar la ecuación (4a) para caída libre. Sustituyendo directamente en la ecuación $v = gt$, obtenemos

$$a) \quad 3\,920 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} = 980 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} \times t$$

Despejando t en la ecuación y eliminando las unidades repetidas, encontramos

$$t = \frac{3\,920 \frac{\text{cm}}{\text{seg}}}{980 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2}} = 4 \text{ seg}$$

b) Aplicando la ecuación (4b), obtenemos, por sustitución directa, lo siguiente:

$$d = \frac{1}{2} \times 980 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} \times (4 \text{ seg})^2 = 7\,840 \text{ cm}$$

4.5 Projectiles. Todos los objetos lanzados al aire, siguen una trayectoria de forma parabólica, pero sólo cuando el rozamiento del aire es insignificante. En los casos reales, el rozamiento se puede considerar despreciable sólo para cuerpos que se mueven lentamente y son de densidad elevada, como piedras grandes, trozos de metal o esferas sólidas. Los proyectiles a gran velocidad, son frenados continuamente por el aire y ello los hace caer más pronto apartando su trayectoria de la parábola, según se ilustra en la figura 4E.

La información que interesa obtener del estudio de un proyectil, es su *altura máxima*, su *alcance* y su *tiempo de vuelo*.

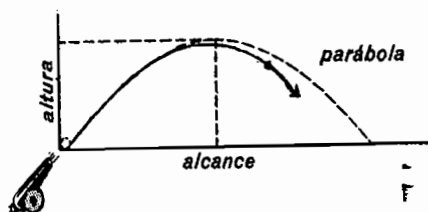


Fig. 4E. Los proyectiles tienden a seguir trayectorias parabólicas. El aire al frenarlos los hace caer antes del alcance calculado.

La *altura máxima*, se define como la mayor altura vertical sobre el suelo que alcanza el proyectil. El *alcance* se define como la distancia horizontal desde el punto de lanzamiento hasta el punto donde el proyectil regresa de nuevo al mismo nivel. El *tiempo de vuelo* se define como el tiempo que necesita el proyectil para llegar nuevamente al nivel desde el que fue lanzado. Experimentalmente se demuestra que estos tres factores dependen de dos cosas: primero, de la *velocidad inicial* dada al proyectil, y segundo, de su *ángulo de lanzamiento*. Este último siempre se mide a partir de la horizontal y se le llama *ángulo de elevación*.

En la fig. 4F se muestran las trayectorias de varios proyectiles a los que se ha dado la misma velocidad inicial, pero diferentes ángulos de elevación. La elevación máxima se obtiene cuando el lanzamiento es vertical hacia arriba y el máximo alcance cuando el ángulo de elevación es de 45° . Esto se puede probar experimentalmente con un pequeño chorro de agua lanzado por un tubo flexible provisto de una boquilla. Cada gota de agua representa un proyectil.

Para proyectiles con gran velocidad, el ángulo de elevación debe ser un poco mayor de 45° debido al rozamiento del aire. Para objetos que se mueven lentamente, como balas, martillos, jabalinas, o saltadores de longitud, en competencias atléticas, el ángulo de 45° dará el máximo alcance.

Si v es la velocidad del proyectil y θ es el ángulo de elevación, la elevación máxima, el alcance y el tiempo de vuelo serán obtenidos por las ecuaciones que contiene la Tabla 4A.

En la fig. 4F las distancias horizontal y vertical fueron calculadas para proyectiles que tuvieran una velocidad inicial de 24 m/seg. Para distintas velocidades iniciales, las trayectorias de los proyectiles tendrán exactamente la misma forma que se ilustra en la figura, pero las distancias tendrán valores diferentes.

Si se lanza un objeto con una velocidad v , subirá a su máxima altura en el mismo

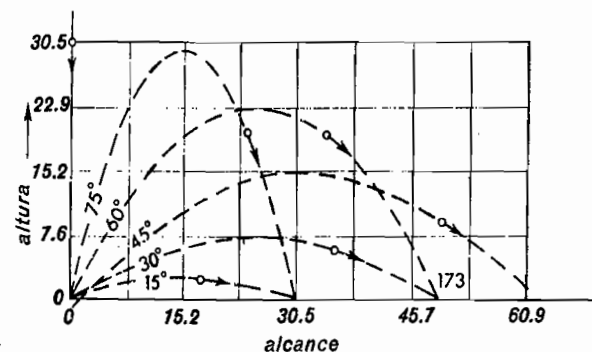


Fig. 4F. Formas de las trayectorias de objetos lanzados a diferentes ángulos de elevación. Los escalas son para el caso especial de una velocidad inicial de 24 m/seg.

TABLA 4A. FÓRMULAS PARA PROYECTILES

Angulo de elev. θ	Altura máxima h	Alcance d	Tiempo de vuelo t
0°	0	0	0
30°	$v^2/8g$	$0.866v^2/g$	v/g
45°	$2v^2/8g$	v^2/g	$1.41v/g$
60°	$3v^2/8g$	$0.866v^2/g$	$1.73v/g$
90°	$4v^2/8g$	0	$2v/g$

cando ambos lados de la ecuación por g , se obtiene

$$v^2 = gd$$

Sustituyendo las cantidades conocidas, obtenemos

$$v^2 = 9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times 17.12 \text{ m} = 168 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}^2}$$

Extrayendo la raíz cuadrada en ambos miembros, obtenemos finalmente

$$v = 13.0 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

4.6 Experimento del cazador y el mono.

Un cazador apunta y dispara una flecha hacia un mono que está arriba de un árbol. En el instante que la flecha sale del arco, el mono se deja caer de la rama en que estaba sentado. Los dos se encontrarán en medio del aire, cualquiera que sea la velocidad de la flecha. Si se pudiera eliminar la gravedad, la flecha viajaría en la trayectoria recta AM y el mono se quedaría en M y sería encontrado por la flecha, como se ilustra en la fig. 4G. Actuando la gravedad, la flecha sigue la trayectoria ABC y el mono cae desde M hasta C. Durante cada fracción de segundo, indicada por $t=1, 2, 3$ y 4 , ambos caen la misma distancia a partir de la posición que tendrían si estuvieran libres de la gravedad, y

tiempo que necesita para caer desde esa altura hasta el suelo, despreciando la resistencia del aire. Como es de esperarse por la observación de la fig. 4F, el objeto llegará al suelo con la misma velocidad con que fue lanzado.

Ejemplo 3. En los Juegos Olímpicos de 1948, efectuados en Londres, el lanzamiento del disco de 16 libras fue ganado por Wilbur Thompson de los Estados Unidos, con una distancia de 17.12 m. Suponiendo un ángulo de elevación de 45° para el lanzamiento, calcular la velocidad inicial.

Solución. Ya que el ángulo de elevación se da como 45° y se conoce el alcance, se usa la tercera ecuación de la tercera columna de la tabla 4 A, es decir, $d = v^2/g$. Multipli-

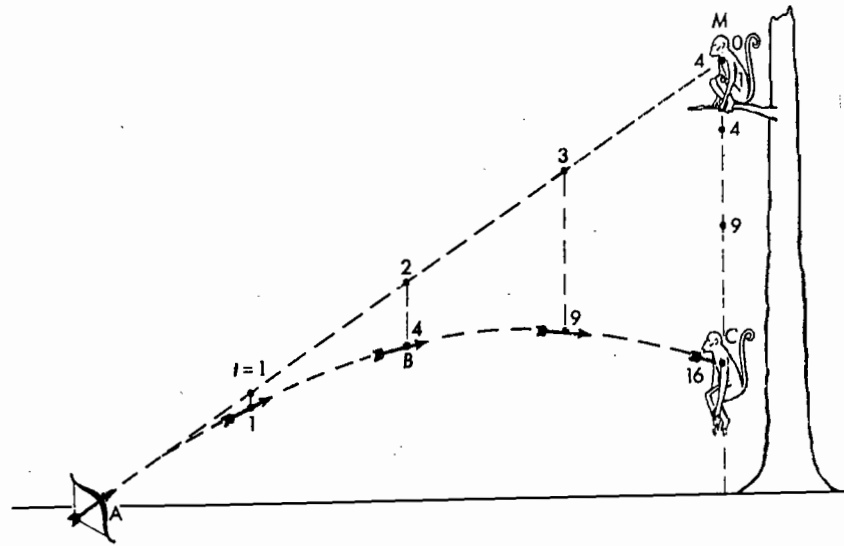


Fig. 4G. El experimento del cazador y el mono.

de todas maneras se encuentran en C. A mayor velocidad del proyectil, más corta será la distancia MC.*

4.7 Ley de la Gravitación Universal, de Newton. Todos hemos oído el relato del episodio en que cayó una manzana sobre el joven Isaac Newton, cuando estaba sentado a la sombra de un manzano. Este incidente puso a pensar a Newton en la caída de los cuerpos y le llevó, a la edad de 23 años, al descubrimiento de la ley de la gravitación universal.

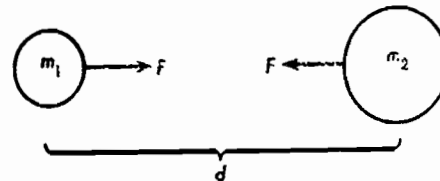
Con frecuencia se ha cometido la equivocación de decir que Newton descubrió la gravedad. Lo que Newton descubrió,

* El experimento del mono y el cazador puede efectuarse lanzando una pequeña esfera de madera a través de un tubo de unos 30 cm de largo. El mono se representará por otra esfera que se dejará libre en el punto M mediante el uso de un pequeño electroimán. Un par de alambres delgados de cobre completarán el circuito eléctrico, cruzados por enfrente de la boca del tubo en A. Cuando pasa el proyectil por este punto, se interrumpe el circuito y queda libre M. El cuerpo M se puede hacer de hierro, hueco o macizo y de cualquiera forma, o bien, puede ser un pequeño mono de juguete, con un pedazo de hierro cosido en la parte superior de la cabeza para que sea atraído por el electroimán.

fue la ley de la gravitación universal. Cualquier par de cuerpos se atraen entre sí con una fuerza directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Escrito con símbolos algebraicos,

$$F \propto \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Como lo ilustra la fig. 4H, F es la fuerza de atracción m_1 y m_2 son las dos masas, y d es la distancia que las separa. La masa

Fig. 4H. Atracción gravitacional entre un cuerpo de masa m_1 y otro masa m_2 .

m_1 atrae a la masa m_2 con una fuerza F hacia la izquierda, y la masa m_2 atrae a m_1 con una fuerza igual F , hacia la derecha. Para obtener una ecuación, a partir de estos símbolos, no se necesita nada más

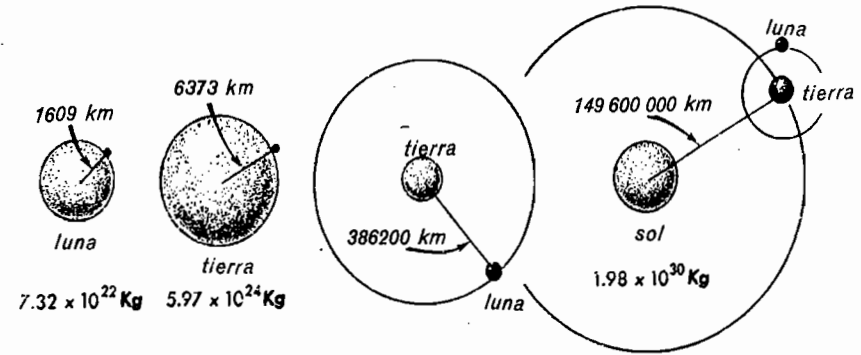


Fig. 4I. La atracción gravitacional mantiene a la Luna en su órbita en torno de la Tierra y a la Tierra en su órbita alrededor del Sol.

que reemplazar la proporción por un signo de igualdad e insertar una constante en cualquiera de los lados de la igualdad.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (4c)$$

Experimentalmente se demuestra que si F se mide en newtons, m_1 y m_2 en kilogramos y d en metros, la constante newtoniana de la gravitación G , tiene el valor

$$G = 0.000\,000\,000\,0666 \frac{\text{m}^3}{\text{kg seg}^2}$$

o en notación abreviada, según el Apéndice VII,

$$G = 6.66 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg seg}^2} \quad (4d)$$

Si se mide F en libras, m_1 y m_2 en slugs y d en pies,

$$G = 3.41 \times 10^{-8} \frac{\text{ft}^4}{\text{lib seg}^2} \quad (4e)$$

Ejemplo 4. Dos locomotoras, con masa de 60 000 kg cada una, están una al lado de la otra, con sus centros a una distancia de 3 metros. Calcular la fuerza de atracción gravitacional que hay entre ellas.

Solución. Por sustitución directa en la ecuación (4c) obtenemos,

$$F = 6.66 \times 10^{-11} \frac{60\,000 \times 60\,000}{3^2} = 0.00266 \text{ newtons}$$

Esta fuerza de 0.00266 newtons es extremadamente pequeña y sería difícil de descubrir y, más aún, de medirse.

Si consideramos ahora la atracción que hay entre un cuerpo muy grande como la Tierra y otro objeto como nuestro propio cuerpo, la fuerza resulta ser bastante grande y fácil de medir, ya que es nuestro propio peso. Esta es la fuerza que nos mantiene en contacto con la Tierra.

Si damos un paso más adelante, la fuerza de atracción gravitacional es la que mantiene a la Luna girando en su órbita en torno de la Tierra, y a la Tierra en su órbita alrededor del Sol. Estas fuerzas tienen magnitudes de millones de millones de millones de toneladas.

Las masas y algunas de las distancias y dimensiones asociadas con varios cuerpos astronómicos, inclusive la Tierra, se presentan en la fig. 4I.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente lo siguiente: a) alcance de un proyectil, b) tiempo de vuelo y c) la constante newtoniana de gravitación.

2. Expresar la Ley de la Gravitación Universal, de Newton. Escribir la ecuación algebraica que representa esta ley. Dibujar un diagrama y señalar en él los diversos factores contenidos en la ecuación.

3. Explicar cuidadosamente el experimento del cazador y el mono, usando un dibujo para explicarlo.

4. Explicar por qué caen con la misma aceleración una piedra de 5 kg y una piedra de 20 kg. (Nota: Usar la Segunda Ley del Movimiento de Newton y la Ley de la Gravitación Universal.)

5. Una piedra pequeña se deja caer desde un puente y llega al agua a los 4.8 seg. Encontrar la altura del puente en metros. (Resp. 112.9 m.)

6. Se cae una maceta del pretil de una ventana y llega al suelo a los 3.2 seg. Encontrar la altura del pretil, en metros.

7. Se tira una piedra desde un puente a 280 ft sobre el agua. a) ¿Cuánto tardará en caer? y b) ¿con qué velocidad llegará al agua? (Resp. a) 4.18 seg; b) 133.8 ft/seg.)

8. Una pelota, lanzada verticalmente hacia arriba, llega a una altura máxima de 460 ft. a) ¿Cuánto tiempo estará en el aire? b) ¿Con qué velocidad llegará a la tierra?

9. Una flecha, disparada verticalmente hacia arriba, alcanza una altura de 520 ft. Encontrar: a) el tiempo total de vuelo y b) la velocidad con que llega a la tierra. (Resp. a) 11.4 seg; b) 182.4 ft/seg.)

10. Una flecha es disparada verticalmente arriba con una velocidad inicial de 34.3 metros/seg. Encontrar: a) la altura máxima alcanzada, y b) el tiempo total de vuelo.

11. Una bola de béisbol, que es bateada recto hacia arriba, es atrapada 8 seg después por el receptor. Encontrar: a) la altura máxima alcanzada, y b) la velocidad inicial hacia arriba. (Resp. a) 78.4 m; b) 39.2 metros/seg.)

12. Una jabalina es lanzada con un ángulo de elevación de 45° a una distancia récord de 280 ft. Encontrar: a) la velocidad inicial y b) la altura máxima alcanzada.

13. Una "bala" es lanzada con un ángulo de elevación de 45° a una distancia record

de 21.5 m. Encontrar: a) la velocidad inicial, y b) el tiempo de vuelo. (Resp. a) 14.5 metros/seg.; b) 2.09 seg.)

14. Se lanza una flecha verticalmente hacia arriba con una velocidad inicial de 96 ft/seg. Dos segundos después se lanza otra flecha hacia arriba con la misma velocidad. ¿A qué altura se cruzarán las dos flechas? (Nota: Haga una gráfica con la altura en el eje vertical y el tiempo en segundos en eje horizontal.)

15. Se lanza una piedra con velocidad de 80 ft/seg a un ángulo de elevación de 30° . Encontrar: a) la máxima altura alcanzada; b) el alcance, y c) el tiempo de vuelo. (Resp. a) 25 ft; b) 173.2 ft; c) 2.5 seg.)

16. En las Olimpiadas de 1956, el lanzamiento del martillo de 16 libras fue ganado por Harold Connolly, de los Estados Unidos de Norteamérica, con un lanzamiento de 207.3 ft. Suponiendo un ángulo de elevación de 45° al lanzarlo, calcular: a) la altura máxima alcanzada; b) la velocidad inicial, y c) el tiempo de vuelo.

17. En las Olimpiadas de 1960, el lanzamiento de jabalina fue ganado por Viktor Tsubulenko, de Rusia, con un lanzamiento de 277.7 ft. Suponiendo un ángulo de elevación de 45° al lanzarla, calcular: a) la máxima altura alcanzada; b) la velocidad inicial, y c) el tiempo de vuelo. (Resp. a) 69.4 ft; b) 94.2 ft/seg; c) 4.16 seg.)

18. En las Olimpiadas de 1960, el lanzamiento de bala de 16 lb fue ganado por William Nieder, de los Estados Unidos de Norteamérica, con un lanzamiento a 64.6 ft. Suponiendo un ángulo de lanzamiento de 45° , encontrar: a) la máxima altura alcanzada; b) la velocidad inicial, y c) el tiempo de vuelo.

19. Una bola de béisbol lanzada con un ángulo de elevación de 60° , llega a una altura de 200 ft. Encontrar: a) la velocidad inicial; b) el alcance, y c) el tiempo de vuelo. (Resp. a) 130 ft/seg; b) 458 ft; c) 7.05 segundos.)

20. Una granada, disparada con un ángulo de elevación de 30° , está 10 seg en el aire. Encontrar: a) la velocidad inicial en m/seg b) la altura máxima alcanzada en metros, y c) el alcance en metros.

5

FUERZAS, VECTORES Y CENTRO DE GRAVEDAD

Todos sabemos que, al pesarnos, estamos midiendo la fuerza que ejercemos hacia abajo sobre la plataforma de la balanza, y que esta fuerza hace que los mecanismos de la balanza indiquen nuestro peso. Cuanto mayor es la fuerza hacia abajo, mayor es el peso indicado por la balanza (véase la fig. 5A). No nos interesa aquí el mecanis-



Fig. 5A. El peso es una fuerza hacia abajo. La Tierra atrae todos los objetos hacia su centro.

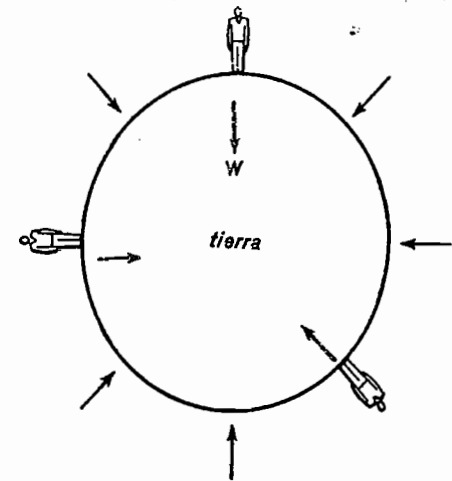


Fig. 5B. El peso se debe a la atracción gravitacional y actúa en la dirección de la línea que une el objeto con el centro de la Tierra.

mo de las palancas, pesas o resortes que tiene adentro la balanza, sino más bien la fuerza hacia abajo que nosotros llamamos el *peso*.

El peso, como lo explicamos en el capítulo anterior, se debe a la atracción gravitacional de la Tierra sobre todos los cuerpos.

El término *fuerza* no se limita sólo a los pesos, sino a la acción de cualquier cuerpo sobre otro. Por ejemplo, al arrastrar un automóvil como se indica en la fig. 5C, actúan dos fuerzas: 1) una fuerza hacia abajo, debida a la gravedad, y 2) una fuerza horizontal, debida a la tracción ejercida sobre la cuerda o cadena con que se arrastra el

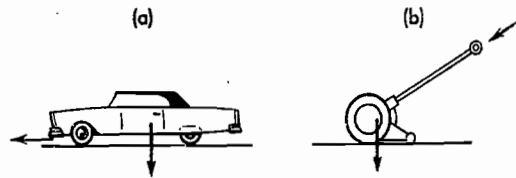


Fig. 5C. Dos fuerzas independientes, actuando sobre un mismo objeto.

vehículo. Esta última fuerza es producida por algún objeto o máquina ajena al automóvil. Al empujar una cortadora de césped, también hay dos fuerzas: 1) la fuerza hacia abajo, debida a la gravedad, y 2) una fuerza inclinada, F , debida a la presión que la persona que va moviendo la cortadora de césped ejerce.

Independientemente de la dirección en que pueda actuar la fuerza, su magnitud puede expresarse en dinas, newtons o libras.

5.1 Las fuerzas se componen vectorialmente. Ya que las fuerzas tienen magnitud y dirección, son cantidades vectoriales, y por ello se someten a las reglas de la *composición de vectores*.

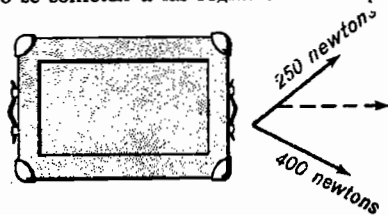


Fig. 5D. Dos fuerzas actuando en distintas direcciones equivalen a una sola fuerza actuando en una dirección intermedia.

Consideremos el diagrama de la fig. 5D que ilustra un baúl pesado, que está siendo arrastrado sobre el suelo mediante dos cuerdas. Sometiéndolo a dos tracciones continuas, de 400 y 250 newtons, ejercidas en direcciones que for-

man 90° entre sí, el baúl se mueve en la dirección señalada por la flecha punteada. Se puede encontrar la *fuerza resultante* por *composición de vectores*. Esta resultante, al ocupar el lugar de las dos fuerzas originales, produce el mismo movimiento.

Cuando se determina esta *resultante* por composición de vectores, se encuentra que tiene una magnitud de 472 newtons y una dirección que forma un ángulo de 32° con la fuerza de 400 newtons.

Para ilustrar los métodos comunes que se usan para la composición de dos fuerzas, obsérvense las ilustraciones de la fig. 5E, donde dos fuerzas de 30 newtons y 50 newtons, respectivamente, se aplican a un cuerpo en un mismo punto B , común para las dos fuerzas. La dirección relativa de la fuerza de 30 newtons, varía en cada uno de los tres casos. Hay dos métodos gráficos generales para obtener la resultante: primero, el *método del paralelogramo*; segundo, el *método del triángulo*.

El método del paralelogramo para composición de vectores, se ilustra en la fig. 5F. Consideremos el diagrama (a). Primero se dibuja una línea horizontal, OA , que represente a la fuerza de 50 newtons. La longitud de la línea se hace de 5 cm para representar la magnitud de la fuerza, y la punta de flecha se coloca en el extremo derecho para señalar su sentido. En forma semejante, se traza la línea OB , de 3 cm de

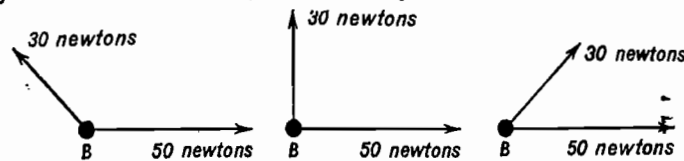


Fig. 5E. Diagramas de dos fuerzas actuando sobre un objeto en distintas direcciones relativas.

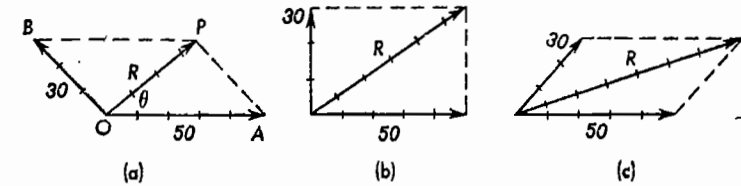


Fig. 5F. Método del paralelogramo para componer vectores.

largo, con la dirección y sentidos asignados representando a la fuerza de 30 newtons.

Del extremo del vector que representa la fuerza de 50 newtons, se traza una línea punteada, paralela al vector de 30 newtons; y del extremo de este último vector, otra línea punteada paralela al de 50 newtons. Se traza la resultante, R , partiendo del origen O llegando al punto P , donde se interceptan las dos líneas punteadas. Usando la misma escala para medir la resultante R , se puede encontrar directamente que vale 35 newtons y el ángulo θ , que forma con la horizontal, puede obtenerse con un transportador, y ver que vale 36° . En otras pa-

se deriva directamente del método del paralelogramo que acabamos de describir. Sólo se necesita dibujar la mitad del paralelogramo.

Por ejemplo, en el diagrama (a) se dibuja a escala el vector de 50 newtons y luego, en la punta de la flecha del vector de 50 newtons, se inicia el vector de 30 newtons, y se dibuja en su verdadera dirección y sentido y con la misma escala. Finalmente, se traza la resultante empezando en el origen, O , y terminando en el punto P , que es la punta de la flecha del segundo vector. Este método del triángulo es preferible al del paralelogramo sólo por su brevedad.

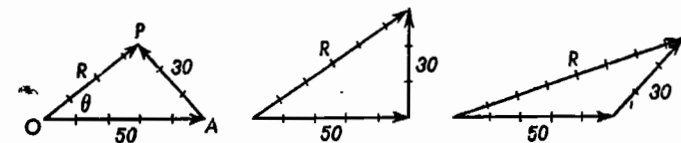


Fig. 5G. Método del triángulo para componer vectores.

labras, la longitud de R da la magnitud de la fuerza resultante, y la dirección de R da la dirección de la fuerza.

Esta fuerza resultante produce exactamente el mismo efecto y equivale a las dos fuerzas originales cuando se aplica al objeto. Hay que señalar que, cuando las fuerzas tienen el mismo sentido o sentidos opuestos, la resultante es igual a la suma o diferencia aritmética respectivamente. Por lo tanto, la magnitud de R puede tener cualquier valor entre la diferencia aritmética, 20 newtons, y la suma aritmética, 80 newtons; dependiendo solamente de las direcciones relativas de las fuerzas originales.

El método del triángulo, para composición de vectores que se ilustra en la fig. 5G,

5.2 Polígono de fuerzas. Cuando actúan simultáneamente tres o más fuerzas sobre un cuerpo, se puede encontrar una fuerza única resultante que, al actuar sobre el cuerpo, produzca el mismo efecto. Para encontrar esta fuerza resultante, se usa frecuentemente el *método del polígono* para la composición de vectores. En principio, éste se deriva del método del triángulo, y consiste en colocar el origen de cada vector en la punta del vector anterior, y continuar de esta manera hasta que se hayan agregado todos los vectores.

En la fig. 5H se da una ilustración del método del polígono, aplicada a cinco fuerzas. El diagrama de la izquierda muestra las fuerzas que actúan sobre el cuerpo en el

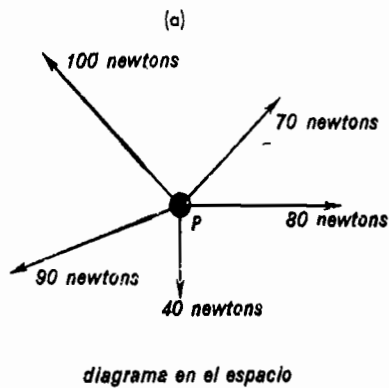


Fig. 5H. Composición gráfica de cinco fuerzas para encontrar su resultante (método del polígono).

punto P , mientras que el *diagrama de vectores* de la derecha, indica la composición de vectores y la fuerza resultante, R . Se traza el vector AB de 8 cm de largo, partiendo del origen A y paralelo al vector de 80 newtons del diagrama (a). En seguida se dibuja el vector BC de 7 cm de largo y paralelo al vector de 70 newtons. Este es seguido sucesivamente por los vectores CD , DE y EF , respectivamente. Habiendo agregado los cinco vectores, puede encontrarse la resultante R , uniendo el origen, A , con la última punta de flecha, F .

Si el dibujo se hizo a escala, la longitud de R dará la magnitud de la fuerza resultante, y la medida del ángulo θ dará la dirección en la cual actúa.

5.3 Condiciones de equilibrio. Cuando hay una o más fuerzas actuando sobre un cuerpo que está en reposo y la resultante

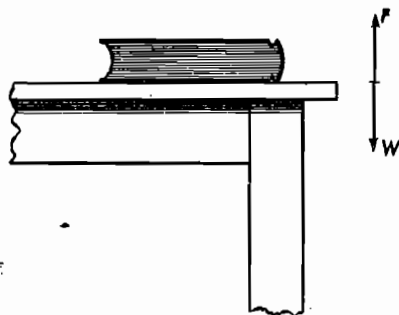
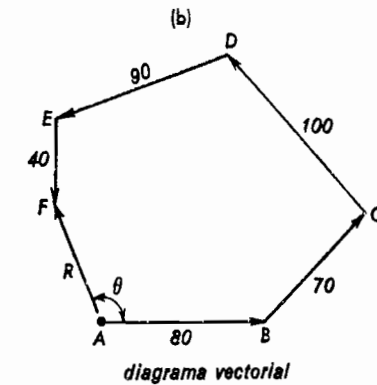


Fig. 5I. Un libro sobre la mesa, está en equilibrio.



de ellos no es nula, el cuerpo se pondrá en movimiento. En esas condiciones se dice que hay una *fuerza no equilibrada* actuando sobre él y esta fuerza es la única que se necesita para determinar la aceleración. En cambio, si la composición de los vectores resulta igual a cero, el cuerpo estará en equilibrio, y seguirá en reposo. Si se invierte esta afirmación, podemos decir que cual-

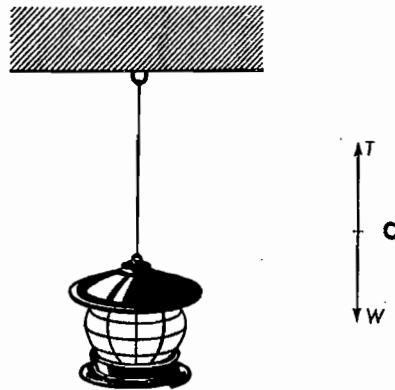


Fig. 5J. Una lámpara colgada del techo está, en equilibrio.

quier objeto que se conserva en reposo, está en equilibrio, y la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre él es cero.

Si el cuerpo está en equilibrio bajo la acción de dos fuerzas únicamente, vemos que deberán ser iguales en magnitud y opuestas en sentido. Un libro puesto sobre una mesa o una lámpara colgando del te-

cho, son dos buenos ejemplos de equilibrio bajo la acción de dos fuerzas (véanse las figs. 5I y 5J).

Las dos fuerzas que actúan sobre el libro, son: W , fuerza hacia abajo debida a la Tierra, llamada peso, y F , el sostén hacia arriba producido por la mesa. Ya que el libro está en equilibrio, la fuerza F es igual en magnitud al peso W . En el caso de la lámpara, la fuerza hacia abajo, o peso, está equilibrada por la tensión hacia arriba producida por la cuerda. Aquí, también, las fuerzas son iguales en magnitud y tienen sentidos opuestos.

Un cuerpo que se mueve con velocidad constante, está en equilibrio, ya que al no haber fuerzas en desequilibrio, no hay aceleración. En el juego con una cuerda, cuan-



Fig. 5K. La tensión de la cuerda es de 10 000 newtons.

do dos grupos opuestos tiran con fuerzas iguales, pero opuestas, de los extremos de la misma, existe una condición de equilibrio. Como se ilustra en la fig. 5K, la fuerza F de 10 000 newtons que actúa para tirar el nudo K hacia la derecha, F , está equilibrada por una fuerza igual, pero contraria, F de 10 000 newtons, tirando hacia la izquierda.

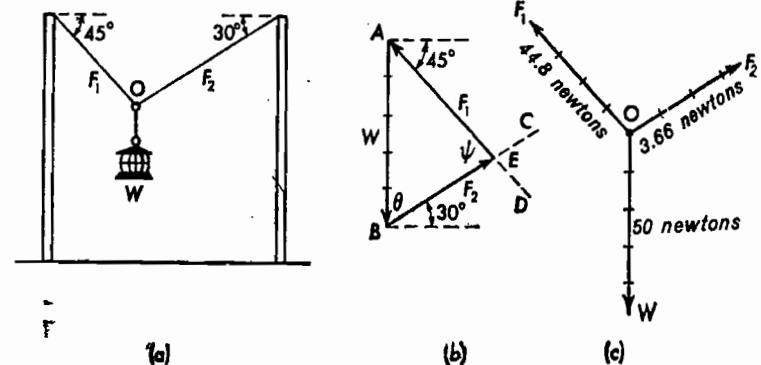


Fig. 5L. La lámpara que cuelga de dos cuerdas, está en equilibrio.

Si las dos fuerzas se hacen desiguales, deja de existir el equilibrio, y el nudo K se moverá en el sentido de la fuerza mayor. Debe notarse que, en el caso del equilibrio, la tensión de la cuerda es de 10 000 newtons, y no de 20 000 newtons. Esta aparente paradoja puede explicarse fácilmente; suponiendo que un equipo amarra su extremo de la cuerda a un poste, el otro equipo tirando con sus 10 000 newtons mantiene la misma condición de equilibrio que antes, y al hacerlo, la tensión de la cuerda es de 10 000 newtons. Puede ser eliminado un equipo y considerar que nada más se encarga de sostener la cuerda de la que está tirando el otro equipo.

5.4 Equilibrio de tres fuerzas. Cuando un cuerpo está en equilibrio como consecuencia de la acción de tres fuerzas, la *resultante* de esas tres fuerzas debe ser cero. En otras palabras, *para estar en equilibrio, el polígono de fuerzas debe quedar cerrado*. Este polígono tendrá solamente tres lados si nada más tenemos tres fuerzas y, por lo tanto, será un triángulo. Considérese el farol suspendido de dos postes ilustrado en la figura 5L.

Las tres fuerzas que actúan en el punto común, O , son: W , el peso de la lámpara de 50 newtons, actuando verticalmente hacia abajo; F_1 , el tirón de una cuerda a 45° hacia arriba, por la izquierda, y F_2 , el tirón de la otra cuerda a 30° hacia arriba por

la derecha. En el diagrama (b) se ilustra el polígono de fuerzas donde vectorialmente,

$$\vec{W} + \vec{F}_2 + \vec{F}_1 = 0 \quad (5a)$$

Al construir este diagrama, se aplican las condiciones de equilibrio para determinar la magnitud de las fuerzas F_1 y F_2 . El procedimiento gráfico es el siguiente: primero se dibuja verticalmente hacia abajo un vector de 5 unidades de longitud para representar a W , el peso del farol. En el extremo B del vector se traza una línea punteada BC paralela a la cuerda que ejerce la fuerza F_2 . Desde el punto A , se traza otra línea, AD , paralela a la cuerda que ejerce la fuerza F_1 . En el punto E , donde se cortan estas dos líneas, se determinan los vectores F_1 y F_2 y se colocan las puntas de las flechas en las direcciones apropiadas. Al medir las líneas continuas AE y BE , resultan tener 4.48 y 3.66 unidades de longitud y, por lo tanto, representan las fuerzas $F_1 = 4.48$ newtons y $F_2 = 3.66$ newtons respectivamente.

5.5 Descomposición de una fuerza en sus componentes. Muchos de los problemas de fuerzas que se presentan en Mecánica, son resueltos muy fácilmente por el *método de las componentes*. Para aplicar este método a problemas típicos, primero se necesita que veamos cómo se puede descomponer un vector en dos componentes. Considérese una fuerza conocida F , formando un ángulo

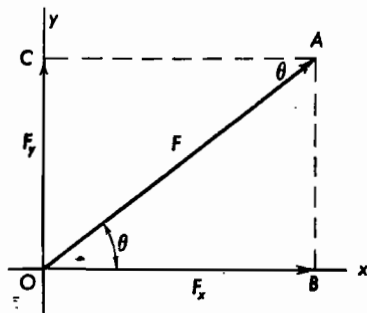


Fig. 5M. Descomposición de un vector en dos componentes perpendiculares.

gulo de θ grados con el eje horizontal x , como se indica en la fig. 5M.

Bajando líneas perpendiculares desde el punto A a los ejes x y y , se obtienen las fuerzas componentes F_x y F_y . Estas dos componentes equivalen a la fuerza original F , ya que, sumándolas vectorialmente, darán como resultante a F .

Siendo F_x y F_y perpendiculares entre sí, los triángulos OAB y OAC , son dos triángulos rectángulos con los lados correspondientes iguales $F_y = BA$ y $F_x = CA$.

Consideremos el siguiente ejemplo de descomposición de una fuerza en dos componentes rectangulares. Un muchacho va tirando de un carro pequeño de 400 newtons, subiéndolo por una pendiente de 30% ilustrada en la fig. 5N. Una pendiente de 30% es aquella que, por cada 100 metros recorridos horizontalmente, tiene una elevación vertical de 30 metros. (No es igual a un ángulo de 30° .)

Para encontrar con qué fuerza debe tirar el muchacho del carro, se descompone el peso del carro en dos componentes, una paralela al plano inclinado y la otra perpendicular a él. El vector W , de 400 newtons, se dibuja verticalmente hacia abajo, como se muestra en el diagrama (b). Después se dibuja una línea paralela y otra perpendicular al plano inclinado, una partiendo de un extremo del vector W y la otra a partir del otro extremo. El punto Q , donde se cortan las dos líneas, determina los valores de los vectores componentes F_x y F_y . Cuando se miden las magnitudes de estas dos fuerzas, se encuentra que tienen valores de 115 newtons para F_x y 383 newtons para F_y . La fuerza F_y es la fuerza que ejercen las ruedas del carro sobre el plano inclinado; y, siendo perpendicular a éste, no ayuda ni estorba al movimiento. Para tirar del carro, el muchacho debe ejercer una fuerza P , igual o mayor que 115 newtons, la magnitud de la componente F_x a lo largo del plano inclinado.

Para ilustrar cómo puede resolverse este mismo problema por medios matemáticos, notemos primero que el *diagrama de fuer-*

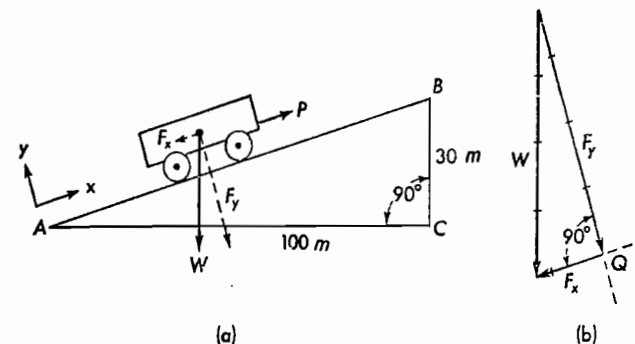


Fig. 5N. Descomposición de un vector en dos componentes.

zas dibujado a la derecha y el plano inclinado de la izquierda, son triángulos semejantes (los lados de uno son perpendiculares a los lados correspondientes del otro). Por lo tanto, podemos usar las proporciones elementales de la geometría para los lados correspondientes de triángulos semejantes. Podemos, entonces, escribir

$$F_x : W = BC : AB, \text{ o } \frac{F_x}{W} = \frac{BC}{AB}$$

Para calcular F_x , debemos conocer la longitud del lado AB . Ya que el triángulo ABC es rectángulo, el cuadrado de la hipotenusa será igual a la suma de los cuadrados de los catetos. Elevando al cuadrado los catetos, sumando esos cuadrados y sacando la raíz cuadrada, obtenemos 104.4. Introduciendo los valores conocidos en la ecuación anterior, obtenemos como resultado.

$$\frac{F_x}{400} = \frac{30}{104.4} \text{ o sea: } F_x = \frac{400 \times 30}{104.4} = 115 \text{ newtons}$$

Por una proporción semejante, puede calcularse la componente F_y y encontrar que vale 383 newtons.

5.6 El bote de vela. Un problema que intriga a muchas personas, principalmente a aquellas que tienen más o menos contacto con los botes de vela, es la posibilidad de navegar contra el viento. Este fenómeno, conocido comúnmente como *navegar por*

bordada o a bordada, es otra ilustración de la descomposición de una fuerza en sus componentes rectangulares.

Como se ven en la fig. 50, el viento viene del Este y el bote va hacia el Nordeste. Cuando se colocan correctamente las velas,

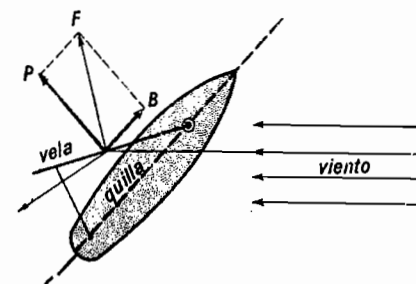


Fig. 50. Un bote navegando hacia el viento. Ejemplo de la descomposición de una fuerza, F , en dos componentes perpendiculares, P y B .

el viento presiona oblicuamente en la vela, y es desviado de tal manera que ejerce una fuerza F , perpendicular a la superficie de la vela. Descomponiendo esta fuerza en dos componentes rectangulares, una paralela y la otra perpendicular al bote, se encuentra la fuerza B que produce el movimiento del bote.

La otra componente, P , tiene poco efecto en el bote, ya que es perpendicular a su movimiento. Es una fuerza inútil que tiende a voltear el barco y a moverlo de lado a la deriva. Los barcos de vela están equi-

pados con una quilla suficientemente profunda para evitar que vuelquen o sean empujados lateralmente. Aumentando el ángulo formado por la vela con la dirección del viento, la fuerza F aumentará; pero la componente que hace avanzar el barco será menor. Si al bote se le da una dirección más opuesta al viento, sin cambiar la posición relativa de la vela, la componente útil B , también disminuirá. El más rápido avance en contra del viento, se obtiene cuando el viento y la quilla forman un ángulo de 45° y las velas se colocan de manera que el timón vaya paralelo a la quilla.

5.7 Centro de masa. El centro de masa de cualquier objeto o sistema de objetos, es un punto tal que si se pasa cualquier

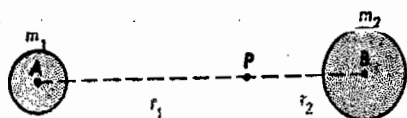


Fig. 5P. El centro de masa de dos objetos está en algún punto de la línea que une sus centros.

plano por él, los momentos de masa de uno y otro lado del plano son iguales. Considere, por ejemplo, las dos esferas de masa m_1 y m_2 ilustradas en la fig. 5P. El centro de masa P queda en la línea que une los centros de los dos cuerpos y en una posición tal que

$$m_1 r_1 = m_2 r_2 \quad (5b)$$

Para un plano vertical que pase por P , perpendicular al plano de la página, $m_1 r_1$ es el momento de masa de m_1 y $m_2 r_2$ es el momento de masa de m_2 .

Ejemplo 1. Encontrar el centro de masa de dos cuerpos, $m_1 = 2$ g, y $m_2 = 5$ g, separados una distancia de 14 cm.

Solución. Ya que la distancia $r_1 + r_2 = 14$ cm, obtenemos

$$r_2 = 14 - r_1 \quad (5c)$$

Sustituyendo todas las cantidades conocidas en la ecuación (5b), obtenemos

$$2r_1 = 5(14 - r_1), \text{ ó } 2r_1 = 70 - 5r_1$$

que nos da

$$7r_1 = 70, \text{ ó } r_1 = 10$$

Sustituyendo el valor de r_1 en la ecuación (5c), encontramos

$$r_2 = 4 \text{ cm}$$

El centro de masa de todos los cuerpos de forma regular, como los ilustrados en la fig. 5Q, está en su centro geométrico. Un plano que pase a través del centro de

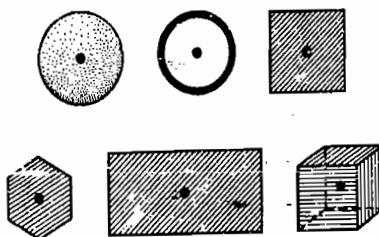


Fig. 5Q. Centros de masa de objetos de forma regular.

cualquiera de estas figuras, dividirá al cuerpo en dos partes iguales.

5.8 Rotación en torno al centro de masa. En la fig. 5R se ven dos masas, m_1 y m_2 , sostenidas en los extremos de una varilla delgada y girando uniformemente alrededor de un eje que pasa por su centro de

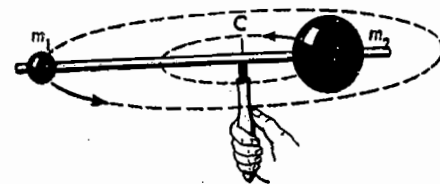


Fig. 5R. Rotación uniforme de dos cuerpos en torno a su centro de masa.

masa. Si se coloca el eje en cualquier otro punto (por ejemplo, a la mitad de la distancia entre las dos masas) el experimentador sentirá una fuerza no equilibrada que actúa sobre su mano, tendiendo a producir un *bailoteo*.

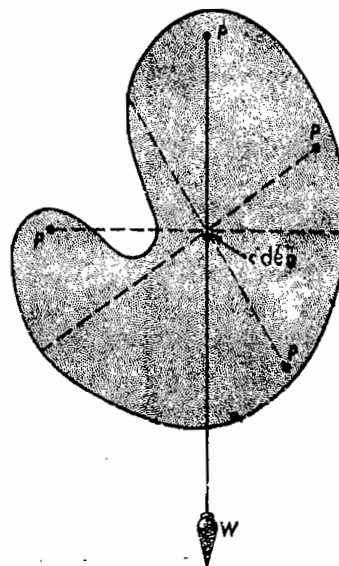


Fig. 5S. El centro de gravedad de un cuerpo suspendido, queda directamente debajo del punto de suspensión.

Si el sistema de dos cuerpos se lanza girando al aire, se observará que lo hace alrededor de su centro de masa, mientras que éste sigue la trayectoria parabólica de los proyectiles. La rotación es uniforme alrededor de este punto, porque las fuerzas centrífugas tienen magnitudes iguales y sentidos opuestos. Teniendo sentidos opuestos, no ejercen ninguna fuerza resultante sobre el eje.

5.9 Centro de gravedad. El centro de masa de los dos cuerpos de la fig. 5P, es el punto único en torno al cual pueden

equilibrarse los dos cuerpos bajo la atracción gravitacional de la Tierra. Más aún, una fuerza única, hacia arriba, aplicada en P , igual en magnitud al peso de los dos cuerpos, mantendrá a éstos en equilibrio; el sistema no tiende a moverse en ninguna dirección ni tiende a girar.

El centro de masa es, por ello, un punto en el que se puede considerar concentrado todo el peso. Por esta razón, es frecuentemente llamado *centro de gravedad*.

El centro de gravedad de un cuerpo superficial de forma regular o irregular, de material uniforme o no uniforme en su densidad, puede encontrarse suspendiéndolo de un punto y luego de otro, como se indica en la fig. 5S. En cada suspensión de un punto P cercano a la periferia, el cuerpo colgará con su centro de gravedad precisamente debajo del punto de suspensión. Las líneas trazadas a lo largo del hilo de la plomada en cada suspensión, se cruzarán en un punto común, que es el centro de gravedad.

Si se coloca un eje en ese punto y se le hace girar o se le lanza girando al aire, la rotación será uniforme alrededor del centro de gravedad. (NOTA: debido a que la fuerza de la gravedad disminuye con la altitud, el centro de gravedad de un cuerpo no está exactamente en el mismo punto que el centro de masa. La parte más baja de la masa, por ejemplo, está más cerca del centro de la Tierra y por ello tiene un mayor peso por unidad de masa. Pero para los usos prácticos, se consideran sinónimos los dos términos, *centro de gravedad* y *centro de masa*.)

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

Nota: En los problemas siguientes, siempre que intervengan ángulos, use un transportador y regla y construya diagramas a escala.

1. Defina o explique brevemente los siguientes términos: a) método del paralelogramo para componer vectores; b) polígono de fuerzas; c) centro de masa; d) centro de gravedad; e) componentes de una fuerza, y f) equilibrio.

2. Haga un diagrama, mostrando la adición vectorial de dos fuerzas, 5 newtons y 12 newtons respectivamente, aplicadas en ángulo recto una con otra. Encuentre la resultante por: a) dibujo a escala, y b) cálculos.

3. Dos fuerzas de 120 newtons y 160 newtons, respectivamente, son aplicadas al mismo cuerpo. Si el ángulo entre sus direcciones es de 90° , encuentre: a) la magnitud, y b) la

dirección de la resultante. (Resp. a) 200 newtons; b) 37° con la fuerza de 160 newtons.)

4. Dos fuerzas de 6 y 10 newtons, respectivamente, se ejercen simultáneamente sobre un objeto grande. Si estas dos fuerzas están en ángulo recto entre ellas, cuál es su resultante?

5. Dos fuerzas de 8 y 15 newtons, respectivamente, actúan en ángulo recto entre ellas. Encuentre su resultante y especifique su dirección. (Resp. 17 newtons a 28° de la fuerza de 15 newtons.)

6. Una fuerza vertical de 50 lb y una horizontal de 30 lb actúan sobre una roca pesada. Encuentre la fuerza resultante.

7. Dos fuerzas actúan simultáneamente sobre un cuerpo. Las fuerzas son: 1) 25 newtons directo al Oeste, y 2) 30 newtons en una dirección de 30° al este del Norte. Encuentre: a) la fuerza resultante, y b) especifique la dirección en que actúa. (Resp. a) 47.7 newtons; b) 33° norte del Este.)

8. Tres fuerzas actúan simultáneamente sobre el mismo cuerpo. Estas fuerzas son: 1) 5 lb a 45° al este del Norte; 2) 4 lb a 30° oeste del Norte, y 3) 7 lb a 30° sur del Este. Encuentre la fuerza resultante y especifique su dirección, empleando el método gráfico del polígono.

9. Las siguientes tres fuerzas actúan sobre un cuerpo: 1) 12 newtons a 30° norte del Este; 2) 9 newtons a 45° oeste del Norte, y 3) 7 newtons a 30° oeste del Sur. Encuentre su fuerza resultante por el método del polígono y especifique la dirección. (Resp. 7.78 newtons a 6.5° oeste del Norte.)

10. Si la lámpara de la fig. 5L pesa 25 lb y los ángulos que las cuerdas forman con la horizontal son 38° y 48° en vez de 45° y 30° respectivamente, encuentre la magnitud de F_1 y F_2 .

11. Si la lámpara de la fig. 5L pesa 120 newtons y los ángulos de las cuerdas con la horizontal son de 25° y 20° en vez de 45° y 30° respectivamente, encuentre las magnitudes de F_1 y F_2 . (Resp. $F_1 = 160$ newtons; $F_2 = 154$ newtons.)

12. Un muchacho tira de un trineo de 60 lb sobre una pendiente helada; la pen-

diente forma un ángulo de 15° con la horizontal. ¿Cuál es la fuerza que debe hacer paralela a la pendiente?

13. Una caja grande, sobre ruedas, pesando 250 lb, es arrastrada sobre un tablón, para subirla a un camión. Si el tablón forma un ángulo de 20° con la horizontal, encuentre la fuerza requerida, paralela al tablón. (Resp. 85.5 lb.)

14. Una caja, que pesa 200 lb, se apoya en un tablón inclinado en un ángulo de 36° con la horizontal. Encuentre las dos componentes de la fuerza ejercidas: a) paralela, y b) perpendicular, respectivamente, al tablón.

15. Un hombre ejerce una fuerza de 280 newtons a lo largo del mango de un rodillo de 200 kg. El mango forma un ángulo de 38° con el suelo. Encuentre: a) la componente horizontal, b) la vertical de esta fuerza, y c) la fuerza total hacia abajo, ejercida por el rodillo sobre el suelo. (Resp. a) 221 newtons; b) 172 newtons; c) 372 newtons.)

16. Un bote de vela está navegando a 45° contra el viento. Si la fuerza resultante ejercida por el viento sobre la vela es de 450 newtons, y la vela forma un ángulo de 30° con la quilla, encuentre la fuerza que hace avanzar al bote.

17. El viento ejerce una fuerza resultante de 75 lb sobre la vela de un bote. Si el ángulo entre el viento y la quilla es de 45° , y el ángulo entre la vela y la quilla es de 25° , encuentre la fuerza que hace avanzar al bote. (Resp. 31.7 lb.)

18. Dos cuerpos de 32 y 45 kg, respectivamente, se encuentran a 5 m de separación. Encuentre su centro de masa.

19. Dos pesos de 6 y 15 lbs, respectivamente, están colocados a 24 in de separación. Encuentre su centro de gravedad. (Resp. 6.9 pulgadas de las 15 lb.)

20. Tres masas iguales, de 12 kg cada una, están situadas en los vértices de un triángulo rectángulo, cuyos lados son de 3, 4 y 5 m, respectivamente. Localice el centro de masa.

6

TRABAJO, ENERGIA Y POTENCIA

Es indudable que la energía es el concepto más importante en toda la naturaleza. Es importante, porque representa una entidad fundamental, común a todas las formas de la materia, en todo el mundo físico conocido. Asociado íntimamente con la energía, está otro concepto, *el trabajo*, término usado en la vida diaria para describir el uso de la energía que uno tiene acumulada o almacenada en el organismo. Debido a que la energía es más fácil de describir en términos de trabajo, este último será estudiado primero. Para definir el trabajo, debemos antes aclarar la diferencia entre *peso* y *masa*.

6.1 Peso y masa. Cuando una masa m cae libremente, recibe una aceleración constante, que es producida por la fuerza de gravedad, que también es constante, al actuar en dirección vertical, hacia abajo. Si se aplica la segunda ley de Newton a este movimiento (véase la ecuación (3a)), la fuerza F no es otra cosa que el peso W del cuerpo, y la aceleración a , es la aceleración debida a la gravedad g . Para los cuerpos que caen libremente, la ecuación $F = ma$, se escribe con otros símbolos:

$$W = mg \quad (6a)$$

Peso = masa \times aceleración

Como vimos en el capítulo anterior, el *peso* y la *fuerza* tienen magnitud y dirección y, por lo tanto, son cantidades vectoriales. La *masa*, por su parte, es una cantidad escalar, ya que sólo tiene magnitud. La diferencia entre *peso* y *masa* se puede

ilustrar imaginando un cuerpo en el espacio, muy alejado de otros cuerpos y de sus atracciones gravitacionales. Allí, este cuerpo en reposo seguirá teniendo masa, pero ya no tendrá peso. Puede demostrarse que este cuerpo tiene masa, si otra masa choca con él. Cuanto menor sea la masa del cuerpo que llega al encuentro, tanto menor será el retroceso de la primera masa, como consecuencia del impacto.

En la Tierra, el peso se debe a la atracción de la gravedad ejercida sobre una masa que esté sobre su superficie. En la ecuación $W = mg$, podemos definir a g como el *peso de la unidad de masa*. W es la *masa* multiplicada por el *peso de la unidad de masa*.

Ejemplo 1. Calcular el peso de un cuerpo que tiene una masa de un kilogramo.

Solución. Sustituyendo directamente en la ecuación (6a), obtenemos

$$W = 1 \text{ kg} \times 9.80 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} = 9.80 \frac{\text{kg m}}{\text{seg}^2} = 9.80 \text{ newtons.}$$

Esta respuesta nos dice que para levantar una masa de 1 kg, se necesita una fuerza vertical hacia arriba de 9.80 newtons y que el peso y la masa difieren numéricamente en el factor de la aceleración debida a la gravedad. Por cálculos semejantes al anterior, se encuentra que la masa de un gramo pesa 980 dinas y que un slug de masa pesa 32 lbs. (Véase la figura 6A.)

Frecuentemente, se necesita convertir las masas, los pesos y las fuerzas conocidas, del sistema métrico al sistema inglés o viceversa.

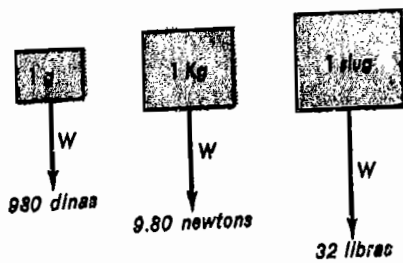


Fig. 6A. El peso es una fuerza igual en magnitud al producto de la masa por la aceleración de la gravedad. $W = mg$.

Con este fin, se pueden usar los siguientes factores de conversión.

$$\begin{aligned} 1 \text{ newton} &= 0.224 \text{ libras} \\ 1 \text{ dina} &= 0.0000224 \text{ libras} \\ 1 \text{ slug} &= 14.6 \text{ kg} \end{aligned}$$

6.2 Trabajo. En su forma más sencilla, el trabajo mecánico es igual al producto de la fuerza por la distancia, a lo largo de la cual actúa la fuerza.

$$\text{trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$

En forma algebraica

$$\text{trabajo} = F \times d \quad (6b)$$

Consideremos el problema general del cálculo del trabajo hecho al levantar una masa m hasta una altura d encima del suelo (véase la fig. 6B).

Por la ecuación (6a), la fuerza necesaria para levantar una masa m , es igual a su propio peso.

$$W = mg$$

Sustituyendo el peso mg por la fuerza F en la ecuación (6b) obtenemos:

$$\text{trabajo hecho} = mg \times d \quad (6c)$$

Para dar valores numéricos, supongamos que la masa es de 5 kg y se levanta verticalmente a una distancia de 2 m. Por sustitución directa en la ecuación (6c) obtenemos

trabajo realizado

$$= 5 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times 2 \text{ m} = 98 \frac{\text{kg m}^2}{\text{seg}^2}$$

Ya que la fuerza en newtons tiene las unidades kg m/seg^2 , la respuesta puede también escribirse así:

$$\text{trab. realizado} = 98 \text{ newtons metros} \quad (6d)$$

El trabajo en el sistema MKS tiene las unidades absolutas $\text{kg m}^2/\text{seg}^2$, que son iguales a las unidades derivadas newton-metros. En el sistema CGS, las unidades

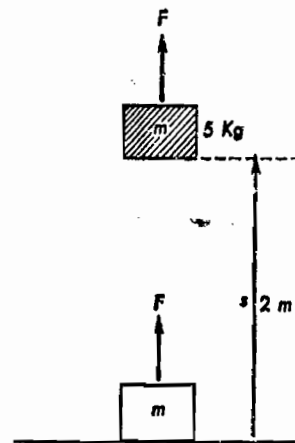


Fig. 6B. Para levantar, verticalmente un cuerpo, se debe hacer un trabajo contra la atracción de la gravedad.

fundamentales correspondientes son $\text{g cm}^2/\text{seg}^2$ que son iguales a las unidades derivadas dina-centímetros. En el sistema inglés, o de ingeniería, la unidad de trabajo es el pie-libra, abreviado ft-lb.

Ejemplo 2. Encuentre el trabajo hecho al levantar un peso de 5 lb a una altura de 10 ft.

Solución. Sustituyendo directamente en la ecuación (6b), obtenemos

$$\text{Trabajo} = 5 \text{ lb} \times 10 \text{ ft} = 50 \text{ ft lb}$$

6.3 Ergios y julios. En el sistema CGS, la dina cm, unidad de trabajo, recibe el nombre de erg (o ergio).

$$1 \text{ dina cm} = 1 \text{ ergio} \quad (6e)$$

Una fuerza de 1 dina actuando a lo largo de una distancia de 1 cm en la misma dirección, realiza un trabajo de 1 ergio.

En el sistema MKS de unidades, una fuerza de 1 newton actuando a través de una distancia de 1 metro en la misma dirección, efectúa una cantidad de trabajo de 1 julio.

$$1 \text{ newton m} = 1 \text{ julio}$$

Ya que el newton, como unidad de fuerza $= 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/seg}^2 = 1000 \text{ g} \times 100 \text{ cm/seg}^2 = 10^5 \text{ dina}$, el newton-metro $= 10^5 \text{ dina} \times 100 \text{ cm} = 10^7 \text{ dina cm}$. En otras palabras,

$$1 \text{ julio} = 10^7 \text{ ergios} \quad (6g)$$

El julio, como unidad de trabajo, es, entonces, mucho mayor que el ergio y se le va a preferir en muchos problemas prácticos, porque así se manejarán números menores en las operaciones aritméticas.

Ejemplo 3. Calcular el trabajo hecho al levantar una masa de 400 g a una altura de 250 cm.

Solución. Las cantidades conocidas son $m = 400 \text{ g}$, $d = 250 \text{ cm}$ y $g = 980 \text{ cm/seg}^2$. Sustituyendo en la ecuación (6c), obtenemos

$$\begin{aligned} \text{trabajo} &= 400 \text{ g} \times 980 \frac{\text{cm}}{\text{seg}^2} \times 250 \text{ cm} \\ &= 98\,000\,000 \frac{\text{g cm}^2}{\text{seg}^2} \end{aligned}$$

$$\text{trabajo} = 98\,000\,000 \text{ ergios}$$

6.4 Trabajo realizado contra el rozamiento. Al deslizar una masa de 5 kg por un plano horizontal, hasta una distancia de 2 m, el trabajo no será tan grande como el necesario para levantar verticalmente la misma masa a dos metros.

Como se ve, en el ejemplo de la fig 6C, el peso de 1 kg de masa es suficientemente grande para vencer el rozamiento y deslizar la masa de 5 kg sobre la mesa. La sustitución directa en la ecuación (6c) hace ver que

trabajo realizado

$$= 1 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times 2 \text{ m} = 19.6 \frac{\text{kg m}^2}{\text{seg}^2},$$

$$\text{o sea, } 19.6 \text{ newton-metros}$$

Esto es sólo la quinta parte del trabajo que se necesita para levantar los mismos 5 kg de masa a una altura vertical de 2 m

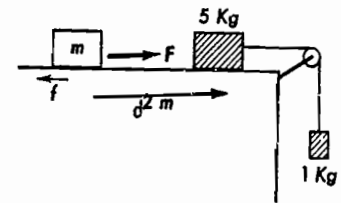


Fig. 6C. Se debe trabajar contra el rozamiento para deslizar un cuerpo sobre un plano horizontal.

(véase la ecuación 6d). Reduciendo el rozamiento entre el trozo de madera y el plano, la fuerza F puede reducirse más todavía. Esta reducción se puede lograr puliendo y lubricando las superficies deslizantes, o, mejor aún, montando el trozo de madera sobre ruedas. Si se pudiera eliminar completamente el rozamiento, el trabajo hecho al mover cualquier objeto en una dirección horizontal, sería prácticamente cero, porque una vez iniciado el movimiento, seguiría moviéndose con velocidad constante. En cambio, un levantamiento vertical requiere, por lo menos, una cantidad de trabajo igual al peso mg multiplicado por la altura d .

Quando se aplica una fuerza a un objeto de modo que la dirección de la fuerza forme un ángulo con la dirección del movimiento, sólo la componente de la fuerza que tiene la dirección del movimiento será efectiva para realizar el trabajo. Esto se ilustra en la fig. 6D, donde se aplica una fuerza F a un baúl pesado para empujarlo por el piso. En el diagrama de la derecha, se descompone esta fuerza en sus componentes horizontal y vertical, F_x y F_y . La fuerza hacia arriba, F_y , tiene un efecto elevador que ayuda a disminuir el rozamiento,

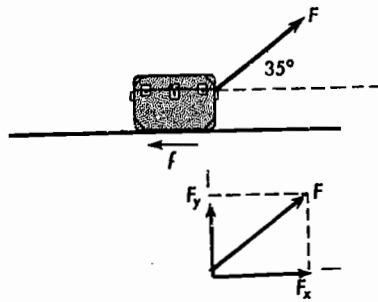


Fig. 6D. La fuerza que arrastra un baúl pesado sobre el piso, se analiza en sus componentes.

mientras que la fuerza horizontal, F_x , es la que realiza el trabajo. Esta fuerza, multiplicada por la distancia horizontal recorrida por el baúl, es igual al trabajo realizado.

$$\text{trabajo realizado} = F_x \times d$$

6.5 Energía potencial. La energía mecánica se divide en dos clases: *Energía potencial* y *energía cinética*. Se dice que un cuerpo tiene energía potencial si, debido a su posición o estado, es capaz de efectuar un trabajo. El agua en la parte alta de una cascada o la cuerda enrollada de un reloj, son ejemplos de objetos que tienen energía potencial. La cuerda del reloj puede mantener a éste trabajando durante un cierto

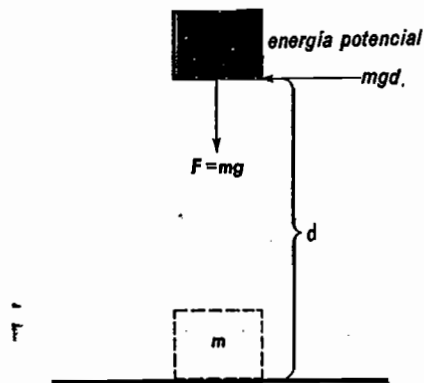


Fig. 6E. Un cuerpo tiene energía potencial debido a su posición.

tiempo y el agua puede, al caer, hacer girar una rueda de aspas. La energía potencial se mide por la cantidad de trabajo que hay disponible; por lo tanto, se mide en *ergios*, *julios* o *pie libras*.

Si se levanta una masa m a una altura d , como se ilustra en la fig. 6E, tendrá entonces una energía potencial $F \times d$ como consecuencia de su posición por encima del nivel del suelo, del cual fue levantada. El trabajo realizado al elevarla, se ha almacenado como energía potencial en el objeto. Esta energía se puede recuperar dejando caer la masa hasta el suelo, pues al hacerlo, podrá efectuar algún trabajo. Por definición,

$$\text{energía potencial} = F \times d \quad (6h)$$

o bien, en unidades de peso, según la ecuación (6a)

$$E.P. = mg \times d.$$

Ejemplo 4. Una masa de 5 kg es levantada a una altura de 2.5 m sobre el suelo. Calcular su energía potencial.

Solución. Sustituyendo las cantidades conocidas en la ecuación (6h), obtenemos

$$E.P. = 5 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times 2.5 \text{ m} = 122.5 \text{ julios}$$

Si se levanta un cuerpo verticalmente, hacia arriba (se sube por una escalera o se tira de él subiéndolo por un plano inclinado), la energía potencial se mide por el peso multiplicado por la altura vertical a que se levanta.

El concepto de *energía potencial positiva*, *nula* y *negativa*, puede ilustrarse con la figura 6F. Un cuerpo que está en cualquier punto por encima del *plano básico*, tendrá energía potencial positiva, mientras que en cualquier punto por debajo de ese plano tendrá energía potencial negativa. Para levantar la masa m desde A hasta B , se hace un trabajo y la masa adquiere energía potencial hasta la cantidad de mgd_1 .

Al regresar de B a A , la masa pierde energía potencial, efectuando un trabajo $= mgd_1$ sobre algún otro cuerpo. De modo

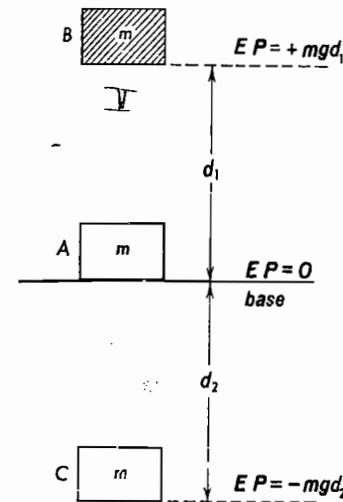


Fig. 6F. La energía potencial puede ser positiva o negativa, referida a un plano básico.

semejante al ir de A hasta C , el cuerpo pierde energía y termina en C con mgd_2 , energía menor que la que tenía en A . Para volverlo a subir hasta A , se tendrá que aplicar al cuerpo una cantidad de trabajo igual a mgd_2 .

La selección del *plano básico* como nivel cero de energía, es puramente arbitraria. En la mayoría de las aplicaciones prácticas, se acostumbra a escoger como nivel cero el punto más bajo a que pueda llegar el objeto, de manera que, medidos desde allí, todos los desplazamientos sean positivos. En el sistema de ingeniería de unidades, la *energía potencial*, al igual que el *trabajo*, se expresa en *pie libras*, o sea, *libras* \times *pies de distancia vertical*.

6.6 Energía cinética. La energía cinética de un cuerpo en movimiento se define como la capacidad de realizar un trabajo debido

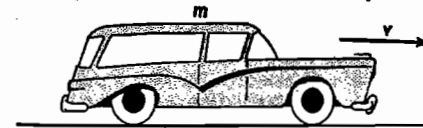


Fig. 6G. Un cuerpo en movimiento tiene energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$.

al movimiento que tiene. Un automóvil que se mueve por una carretera, tiene energía cinética de translación; y cualquier volante que esté girando, tiene energía cinética de rotación (ver fig. 6G). Para una masa m , moviéndose en línea recta con velocidad constante v , la energía cinética se obtiene por

$$\text{energía cinética} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6i)$$

Ejemplo 5. Calcular la energía cinética de una masa de 20 kg, moviéndose con una velocidad de 4 m/seg.

Solución. Por sustitución directa en la ecuación (6i), obtenemos

$$E.C. = \frac{1}{2} \times 20 \text{ kg} \times \left(4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right)^2 = 160 \frac{\text{kg m}^2}{\text{seg}^2}$$

Esta respuesta tiene exactamente las dimensiones del *trabajo*, y de la *energía potencial*, y puede escribirse en las mismas unidades derivadas.

$$\text{energía cinética} = 160 \text{ julios}$$

Un cuerpo en movimiento tiene energía, ya que, para detenerlo, otro objeto debe ejercer sobre él una fuerza F , y al actuar esta fuerza, a lo largo de una distancia d , efectúa un trabajo.

En otras palabras, un cuerpo en movimiento puede realizar trabajo. Inversamente, por la aplicación de una fuerza hori-

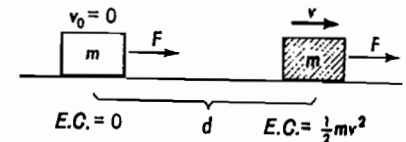


Fig. 6H. Un cuerpo tiene energía cinética debido a su movimiento.

zontal, F , sobre un cuerpo de masa m , a lo largo de una distancia d , se le dará una energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$. (Véase la fig. 6H.)

$$F \times d = \frac{1}{2}mv^2 \quad (6j)$$

Esto se conoce como la "ecuación del trabajo". En ella se desprecia completamente la fricción y se supone que el cuerpo parte del reposo.

Ejemplo 6. Una fuerza horizontal constante de 25 newtons se aplica a lo largo de una distancia de 20 m a un pequeño automóvil de carreras de 2 500 newtons. Si se desprecia la fricción, y el automóvil parte del reposo, ¿qué velocidad obtiene?

Solución. Los valores conocidos son $F = 25$ newtons, $d = 20$ m y $m = 2\,500/9.8$ kg. Al aplicar la ecuación (6j) a este problema, se trasladan todos los factores, excepto v^2 al otro lado de la ecuación, y entonces se hace la sustitución como sigue:

$$v^2 = \frac{2(F \times d)}{m} = \frac{2(25 \times 20)}{2\,500/9.8} = 3.92 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}^2}$$

$$v = 1.98 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Nótese que, al resolver este problema, se debe considerar la masa m en kg, es decir, newtons de peso divididos por g en m/seg^2 .

6.7. Potencia. La potencia se define como la rapidez con que se efectúa el trabajo.

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}$$

$$P = \frac{F \times d}{t} \quad (6k)$$

Cuanto más rápidamente se hace un trabajo, mayor es la potencia. En otras palabras, cuanto menor sea el tiempo t en la ecuación anterior, mayor será la fracción $F \times d/t$ y la potencia P .

En la fig. 6I se da una buena ilustración de la potencia. Un carro elevador con masa m se levanta a una distancia d , en un tiempo definido t . Si se conocen estas tres cantidades, sus valores sustituidos en la Ec. (6k) darán la potencia que se está desarrollando durante el tiempo de subida.

En el sistema métrico, donde el trabajo se mide en *ergios* o *julios*, la potencia se expresa en *ergios por segundo* o en *julios*

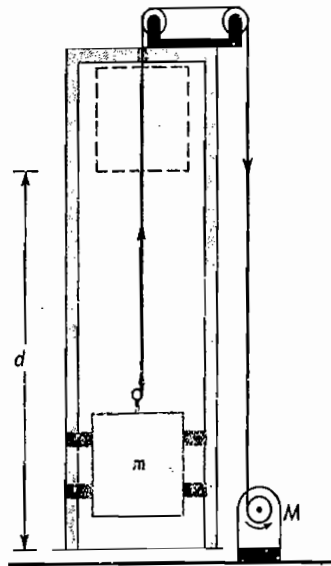


Fig. 6I. Demostración de un elevador de concreto. Ver problemas 5 y 46.

por segundo. Un julio por segundo se llama *vatio*, unidad de potencia.

$$1 \text{ julio/seg} = 1 \text{ vatio} \quad (6l)$$

El *kilovatio* es otra unidad de potencia, y es igual a 1 000 vatios.

En el sistema de ingeniería, con el trabajo medido en *pie-libras*, la potencia se expresa en *pie-libras por segundo*, y en *caballos de potencia* (abrev. *hp*.)

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ ft lb/seg} \quad (6m)$$

Ejemplo 7. Encuentre la potencia de una máquina capaz de levantar 200 lb a una altura de 55 ft en 10 seg.

Solución. Por sustitución directa en la ecuación (6k), obtenemos

$$P = \frac{200 \text{ lb} \times 55 \text{ ft}}{10 \text{ seg}} = 1\,100 \text{ ft lb/seg.}$$

Dividiendo esta respuesta entre 550 para obtener caballos, encontramos

$$\frac{1\,100}{550} = 2 \text{ hp.}$$

Si 550 ft lb/seg se cambia al sistema métrico ($1 \text{ ft} = 0.305 \text{ m}$ y $1 \text{ lb} = 0.454 \text{ kg}$), encontramos

$$1 \text{ hp} = 746 \text{ julios/seg} = 746 \text{ vatios} \quad (6n)$$

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Defina o explique brevemente cada uno de los siguientes términos: a) energía cinética; b) trabajo; c) vatio; d) ergio, y e) newton metro.

2. Defina o explique brevemente cada uno de los siguientes términos: a) energía potencial; b) potencia; c) caballo de potencia; d) joule, y e) dina centímetro.

3. Explique claramente la diferencia entre: a) energía y potencia; b) julio y vatio, y c) pie libra y caballo de potencia.

4. Encuentre el trabajo hecho cuando un hombre de 150 lb escala una montaña hasta una altura de 1 milla.

5. Un elevador de concreto que pesa 620 libras es levantado a una altura de 75 ft. Encuentre el trabajo hecho. Ver. fig. 6I. (Resp. 46 500 ft lb.)

6. Una carga de 2 000 kg es levantada a 24 m por una grúa. Encuentre el trabajo efectuado.

7. Un carro elevador, de 2 800 kg de masa, es levantado del primer piso de un edificio al vigésimo piso. Si la distancia media entre pisos es de 4 m. ¿Cuánto trabajo se hace? (Resp. 2 085 000 julios.)

8. Una masa de 5 kg tiene una velocidad de 16 m/seg. ¿Cuál es su energía cinética?

9. Una bala de 15 g, disparada por un rifle de cacería, tiene una velocidad de salida de 650 m/seg. Encuentre la energía cinética en: a) ergios, y b) en julios. (Resp. a) 3.17×10^{10} ergios; b) 3 170 julios.)

10. Un carro que pesa 2 tons (cortas) tiene una rapidez de 60 mi/h. Encuentre su energía cinética en ft lb.

11. Una masa de 25 kg, cae libremente desde una altura de 220 m. Encuentre: a) la energía potencial antes de soltarla, y b) la energía cinética en el momento en que va a llegar al suelo. (Resp. a) 53 900 julios; b) 53 900 julios.)

12. Una bala de 16 lb es tirada desde una altura de 24 ft. Encuentre: a) la energía potencial antes de soltarla, y b) la energía cinética en el momento que va a llegar al suelo.

13. Un elevador, de masa 1 500 kg, sube 80 m en 14 seg. Encuentre la potencia en kilovatios. Ver fig. 6I (Resp. 84 kv.)

14. Un camión de 5 ton (cortas) sube por una cuesta de 10% hasta una altura vertical de 900 ft en 15 min. Encuentre: a) la energía potencial almacenada, y b) la potencia promedio desarrollada.

15. Un elevador de concreto levanta una carga de 150 kg a una altura vertical de 75 metros en 8 seg. Encuentre la potencia usada en kilovatios. Ver fig. 6I. (Resp. 13.8 kv.)

16. Un camión de 3 600 kg de masa requiere una fuerza de 800 newtons para mantenerse en movimiento en un camino recto y a nivel, a razón de 15 m/seg. Encuentre: a) la energía cinética, y b) la potencia desarrollada.

17. Una fuerza ascendente de 2 000 newtons, y en un ángulo de 45° con la horizontal, es capaz de mover una caja pesada a 6 m sobre el piso. Encuentre el trabajo hecho. (Resp. 8 480 julios.)

18. Un globo, portador de instrumentos a grandes alturas, lleva una carga de 5.2 kv a una altura de 12 000 m en 30 min. Encuentre: a) el trabajo hecho, y b) la potencia desarrollada.

19. Se bombea agua de un río a un depósito, a una elevación total de 60 m, a razón de 5 m³/h. ¿Cuál es la potencia mínima necesaria? Un metro cúbico de agua tiene una masa de 1 000 kg. (Resp. 0.817 kv.)

20. ¿Cuántos metros cúbicos de agua pueden bombearse en una hora de un río a un tanque de agua por una bomba de 5 kv? Considere una elevación de 40 m. Un metro cúbico de agua tiene una masa de 1 000 kg.

CONSERVACION DE LA ENERGIA Y DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO

7.1 Conservación de la energía. La más importante de todas las leyes de la Naturaleza es la de la conservación de la energía. Aunque esta ley se ha establecido casi en tantas formas diferentes como textos se han escrito sobre el tema, todas ellas tienen en realidad el mismo significado. Los tres ejemplos siguientes son expresiones típicas de esta ley: 1) *siempre se conserva la energía al transformarse de una clase a otra;* 2) *la energía no se puede crear ni destruir;* o 3) *la suma total de toda la energía del universo se mantiene constante.*

Todos debemos darnos cuenta del hecho de que hay muchas formas de energía; además de las dos formas de *energía mecánica*, ya definidas, hay *energía calorífica*, *energía eléctrica*, *energía química*, *energía luminosa* y *energía atómica*. En este capítulo, nos ocupamos de la ley de la conservación de la energía, aplicada sólo a las dos formas de la energía mecánica, *potencial* y *cinética*. La ley de la conservación de la energía volverá a encontrarse en conexión con las otras formas de energía en los capítulos que se estudian: calor, electricidad y estructura atómica.

Considérese la energía que tiene la cascada representada en la fig. 7A. El agua encima de la cascada tiene energía potencial, en virtud de su posición encima de la base. Conforme cae hacia abajo, con velocidad cada vez mayor, su energía cinética, $\frac{1}{2}mv^2$, aumenta mientras la energía potencial disminuye. Al final de la caída, la energía potencial se acerca a cero y la energía

cinética llega a su valor máximo. En la parte de arriba, la energía era casi toda potencial, mientras que cerca del fondo es casi toda cinética. Suponiendo que el agua parte del reposo encima de la cascada y no

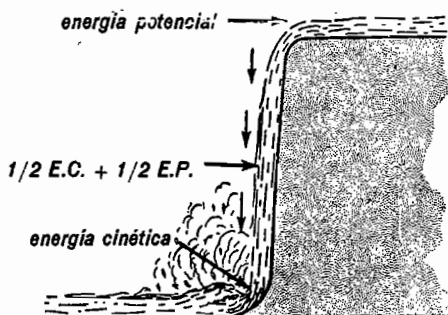


Fig. 7A. Encima de la cascada, toda la energía disponible es potencial. Al pie de la cascada, toda es cinética.

pierde energía al caer, la energía potencial, al comenzar la caída, será igual a la energía cinética en el fondo.

$$E.P. \text{ arriba} = E.C. \text{ en el fondo,}$$

$$F \times d = \frac{1}{2}mv^2, \quad (7a)$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2. \quad (7b)$$

O suprimiendo la m en los dos miembros de la ecuación y despejando v ,

$$v^2 = 2gd \text{ ó } v = \sqrt{2gd} \quad (7c)$$

Esta ecuación especial para la velocidad de los cuerpos que caen libremente, puede también derivarse de las ecuaciones (4a) y

(4b). Su derivación se deja a los estudiantes como ejercicio (véase el problema 9).

Ejemplo 1. Una masa de 25 kg se deja caer desde una altura de 5 m. Encontrar la energía cinética y la velocidad en el momento en que llega a tierra.

Solución. Ya que la energía potencial arriba es equivalente a la energía cinética en el fondo.

$$E.P. = 25 \text{ kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \times 5 \text{ m} \\ = 1225 \text{ julios} = E.C.$$

La velocidad se encuentra por la Ec. (7c)

$$v = \sqrt{2 \times 9.8 \times 5} = 9.9 \text{ m/seg}$$

• Cuando el cuerpo del problema anterior, está a medio camino, tiene algo de energía potencial y algo de energía cinética. Su energía total E será, pues, de dos clases,

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh \quad (7d)$$

En el instante en que el cuerpo llega al suelo, es detenido bruscamente y toda su energía se transforma rápidamente en calor. La transformación de energía mecánica en calor, es demostrada con frecuen-

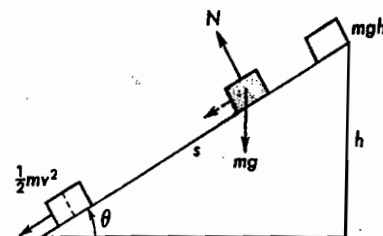


Fig. 7B. La energía potencial puede volverse cinética al bajar una pendiente.

cia en el laboratorio de física por un experimento en que son lanzadas unas esferas de plomo desde una altura de varios metros y se mide su temperatura antes y después de la caída. Dejando caer las esferas varias veces, se logran elevaciones de temperatura de varios grados.

Considerar el caso de un cuerpo que se desliza bajando por un plano inclinado a partir del reposo. En la parte alta del plano inclinado, una masa m tiene una energía potencial mgh y no tiene energía cinética. (Véase la fig. 7B.) Al llegar al fondo, la energía potencial se ha reducido a cero, y la energía es toda cinética. Por la conservación de la energía total, tenemos

$$E \text{ total arriba} = E \text{ total abajo,}$$

$$(E.P.)_1 + (E.C.)_1 = (E.P.)_2 + (E.C.)_2, \quad (7e)$$

$$mgh + 0 = 0 + \frac{1}{2}mv^2$$

de donde

$$v = \sqrt{2gh} \quad (7f)$$

Esta es, precisamente, la velocidad adquirida por un cuerpo que cae libremente desde una altura h : (Véase la ecuación 7c.) Este resultado es interesante, porque hace ver que la velocidad adquirida por un cuerpo, que se desliza sin rozamiento por un plano inclinado de cualquier ángulo θ , equivale en magnitud a la velocidad adquirida por un cuerpo que cae libremente desde la misma altura h . Debe notarse que, aunque la velocidad final es la misma, las aceleraciones y los tiempos de caída son diferentes.

7.2 El péndulo simple. Se le puede dar un planteamiento semejante al estudio de

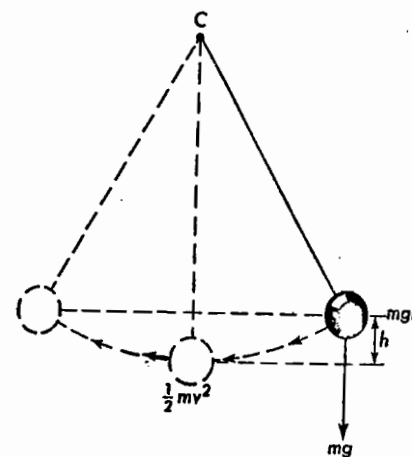


Fig. 7C. En el péndulo se convierte la energía potencial en cinética y nuevamente en potencial.

la energía en la oscilación de un péndulo simple. En los extremos de su oscilación (véase la fig. 7C), la esfera queda momentáneamente en reposo y la energía E es potencial toda ella y vale mgh . En la parte más baja de la oscilación, la energía E es toda cinética y vale $\frac{1}{2}mv^2$.

El movimiento de la esfera del péndulo es como el de un cuerpo que se desliza sin rozamiento, bajando por un plano inclinado de ángulo variable. La energía cinética

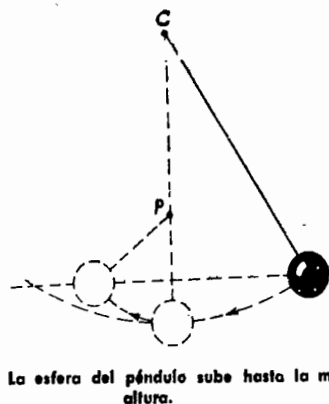


Fig. 7D. La esfera del péndulo sube hasta la misma altura.

adquirida al bajar por un lado es justamente suficiente para hacerlo subir hasta una altura igual en el otro lado. Si se sujeta el hilo con un alfiler en P, como se indica en la fig. 7D, la esfera subirá hasta la misma altura h .

7.3 Conservación de la cantidad de movimiento. Cuando dos o más cuerpos chocan entre sí, la cantidad de movimiento se conserva constante. La ley de la conservación de la cantidad de movimiento se aplica a todos los fenómenos de colisión, y establece que la cantidad total de movimiento antes del impacto, es igual a la cantidad total de movimiento después del mismo. Considérese como ejemplo el encuentro de frente de dos esferas, tal como se ilustra en la fig. 7E. Antes del impacto, la masa m_1 se mueve con una velocidad u_1 y tiene una cantidad de movimiento m_1u_1 , mientras m_2 se mueve con una velocidad u_2 y tiene una cantidad de movimiento m_2u_2 . La cantidad

de movimiento total antes del impacto será entonces igual a la suma de las dos cantidades de movimiento $m_1u_1 + m_2u_2$.

Por un razonamiento semejante se ve claramente que, después del impacto, m_1 y m_2 , con sus nuevas velocidades v_1 y v_2 ,

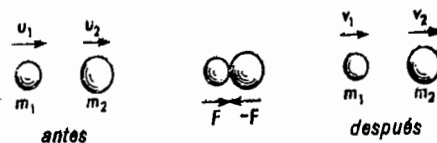


Fig. 7E. La cantidad total de movimiento de dos cuerpos es igual antes y después de su impacto.

tienen una cantidad de movimiento total $m_1v_1 + m_2v_2$. La ley de la conservación de la cantidad de movimiento requiere que

cant. de mov. total antes
= cant. de mov. total después

$$m_1u_1 + m_2u_2 = m_1v_1 + m_2v_2 \quad (7g)$$

Se producen dos fuerzas iguales, pero contrarias, entre los cuerpos, durante el impacto: una fuerza ejercida por m_1 sobre m_2 y la otra fuerza ejercida por m_2 sobre m_1 . Estas dos fuerzas iguales, pero contrarias, son una acción y su reacción, como lo explicamos en la tercera ley del movimiento de Newton. Cada fuerza actúa durante el mismo intervalo de tiempo, dando el mismo cambio a la cantidad de movimiento de ambos cuerpos. Un cuerpo gana tanta cantidad de movimiento como la que el otro pierde. En otras palabras, la cantidad de movimiento total se mantiene constante.

Ejemplo 2. Una bola de marfil de 5 kg de masa, moviéndose con una velocidad de 20 m/seg, choca con otra bola de marfil de la misma línea, con una velocidad de 10 m/seg. Después del impacto, la primera masa sigue moviéndose en la misma dirección, pero con una velocidad de sólo 8 m/seg. Calcular la velocidad de la segunda masa después del impacto.

Solución. Por sustitución directa en la ecuación (7g), obtenemos

$$\begin{aligned} (5 \times 20) + (10 \times 10) &= \\ &= (5 \times 8) + (10 \times v_2) \\ 200 &= 40 + 10v_2 \\ 10v_2 &= 160 \\ v_2 &= 16 \text{ m/seg.} \end{aligned}$$

La segunda masa tiene una velocidad de 16 m/seg, después del impacto. Si en el ejemplo anterior se calcula la energía cinética total después del impacto y se compara con la energía cinética total antes del mismo, se encuentra que no son iguales las dos. Empleando la ecuación energía cinética $= \frac{1}{2}mv^2$, tenemos

$$\begin{aligned} (E.C.)_1 &= \frac{1}{2}(5 \times 20^2) + \frac{1}{2}(10 \times 10^2) \\ &= 1500 \text{ julios antes del impacto.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (E.C.)_2 &= \frac{1}{2}(5 \times 8^2) + \frac{1}{2}(10 \times 16^2) \\ &= 1440 \text{ julios después del impacto.} \end{aligned}$$

La diferencia en energía, 60 julios, ha desaparecido como energía mecánica y se ha convertido en calor. Las dos masas fueron deformadas ligeramente durante el impacto, como consecuencia de las fuerzas mutuas, y se genera una pequeña cantidad de calor interno. Este calor produce una elevación de temperatura de los dos cuerpos que chocan. Para que resulte correcta la aplicación de la ley de conservación de energía, es necesario sumar esta energía calorífica de 60 julios a la energía mecánica después del impacto.

Esta es otra forma de afirmar que, en general, las colisiones no son perfectamente elásticas. Si fueran perfectamente elásticas, se lograría la conservación de la energía mecánica a la vez que la conservación de la cantidad de movimiento. Los choques perfectamente elásticos ocurren entre los átomos y moléculas *ultramicroscópicas* de un gas, pero no entre los cuerpos *macroscópicos* que manejamos en la vida diaria. Cuanto menos elásticos sean los cuerpos que chocan, más energía mecánica se transforma en calor. En el Capítulo 11 se estudiará la elasticidad y su aplicación en los problemas de los choques.

Es importante hacer notar, en esta discusión del ejemplo 2, que *para todos los problemas de choques debe aplicarse la ley de la conservación de la cantidad de movimiento y no la ley de la conservación de la energía.*

7.4 Experimentos. Se presenta en la figura 7F un interesante experimento que ilustra el principio de la conservación de la cantidad de movimiento. Dos carritos de masas iguales $m_1 = m_2$, se amarran entre sí con un resorte comprimido entre ellos. Cuando se quema la cuerda que los libera, liberándose el resorte, saltan los dos carritos,

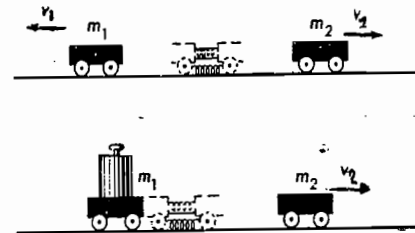


Fig. 7F. Conservación de la cantidad de movimiento.

alejándose con velocidades iguales. Los carritos estaban en reposo antes de que se dejara libre el resorte, y la cantidad de movimiento total sigue siendo cero, ya que las dos velocidades tienen direcciones opuestas. Siendo vectoriales las cantidades de movimiento

$$m_1v_1 + m_2v_2 = 0 \quad (7h)$$

Tomando como positivos los movimientos hacia la derecha, v_2 es positiva y v_1 es negativa, y las dos cantidades de movimiento se anulan mutuamente.

Si se repite ese mismo experimento con uno de los carritos cargado, (b), salen los dos carritos alejándose como antes, pero con velocidades distintas. El carrito más ligero se mueve con una velocidad mayor, mientras el carrito con mayor masa se aleja con menor velocidad. El producto $m_1 \times v_1$, sigue siendo igual al producto $m_2 \times v_2$, y la suma de las dos cantidades de movimiento es 0.

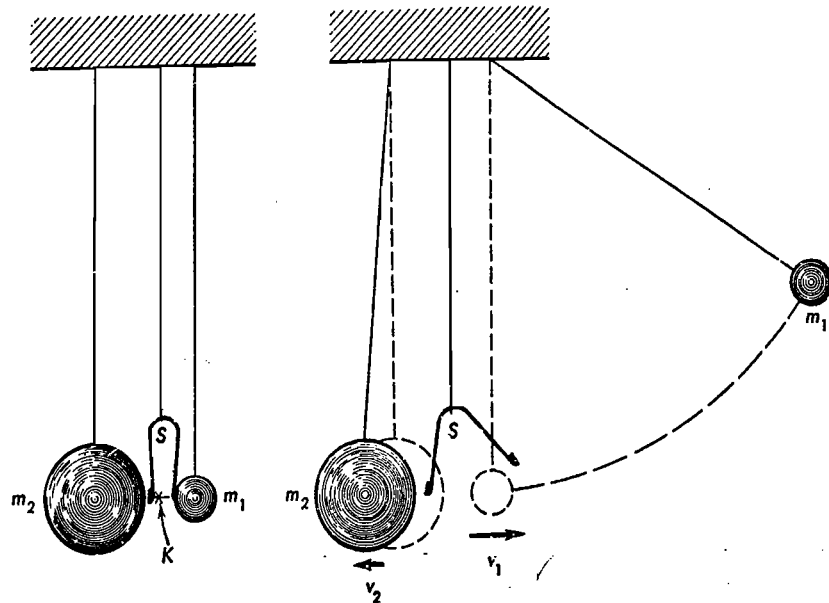


Fig. 7G. Un péndulo ligero y otro pesado ilustran la ley de la conservación de la cantidad de movimiento.

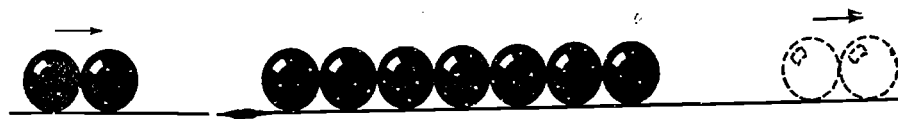


Fig. 7H. Experimento con bolas de billar, que ilustra la conservación de la cantidad de movimiento.

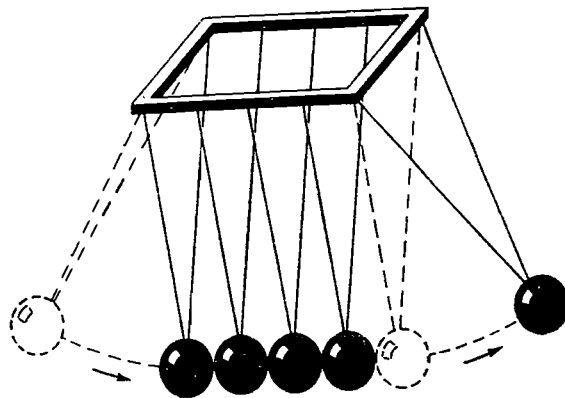


Fig. 7I. Experimento con bolas de boliche, que ilustra la ley de la conservación de la cantidad de movimiento.

Ejemplo 3. Se dispara un proyectil de 60 kg con una velocidad inicial de 500 m/seg con un cañón de 2 000 kg. ¿Cuál es la velocidad inicial con que el cañón retrocede?

Solución. Aplicando la ecuación (7h), y sustituyendo directamente las cantidades conocidas, obtenemos

$$60 \text{ kg} \times 500 \text{ m/seg} + 2\,000 \text{ kg} \times v_2 = 0$$

$$30\,000 \text{ kg m/seg} + 2\,000 v_2 \text{ kg} = 0$$

$$v_2 = \frac{30\,000 \text{ kg m/seg}}{-2\,000 \text{ kg}} = -15 \text{ m/seg.}$$

El cañón retrocede con una velocidad de 15 m/seg.

Con los dos péndulos de la fig. 7G se hace un experimento que ilustra la velocidad de retroceso de una masa pesada, como la del ejemplo 3. Se fija un muelle en forma de U entre una bola pesada de hierro, m_2 , y una ligera de madera m_1 , comprimiéndolo y amarrándolo con una cuerda K. Cuando se quema la cuerda K, se libera el muelle y saltan las dos masas alejándose con cantidades de movimiento iguales y opuestas. La masa pequeña adquiere una gran velocidad y sube a una altura considerable, mientras que apenas se aprecia el movimiento de la masa grande.

Puede efectuarse otro experimento interesante, que ilustre la conservación de la cantidad de movimiento, con 8 ó 9 bolas de billar y una tabla acanalada como se indica en la fig. 7H. Cuando se lanza una bola y se hace pegar a las otras, se detendrá por el choque con la primera bola y la bola del extremo se moverá, alejándose casi con la misma velocidad. Si se lanzan dos bolas, como se indica en el diagrama, saldrán también dos bolas en el otro extremo, y si se lanzan tres bolas, saldrán tres, etc. Este experimento resulta mejor con bolitas de vidrio o balines de acero, ya que son muy elásticos; pero las bolas de billar producen un efecto más espectacular.

Pregunta. ¿Por qué, al lanzar dos bolas, no sale una sola del otro lado con una velocidad doble, conservando la cantidad de movimiento?

Respuesta. La respuesta a esta pregunta comprende la conservación de la energía, además de la conservación de la cantidad de movimiento. Si saliera una sola bola con doble velocidad, su energía cinética sería dos veces mayor que la energía entregada por las dos bolas que llegaron rodando.

Puede hacerse un experimento espectacular, de naturaleza semejante a éstos, suspendiendo 4 ó 5 bolas grandes de boliche desde el techo de la habitación, como se ilustra en la fig. 7I. Cuando se levanta una bola y luego se deja libre, será detenida por las otras y al mismo tiempo la bola del extremo opuesto salta hacia afuera, con la misma velocidad aproximadamente. Si se lanzan dos bolas, se hará que por el otro lado salten dos, etc.

La fuerza impulsora de un avión o cohete de retropropulsión se deriva del principio de la conservación de la cantidad de movimiento. Ver. fig. 7J.

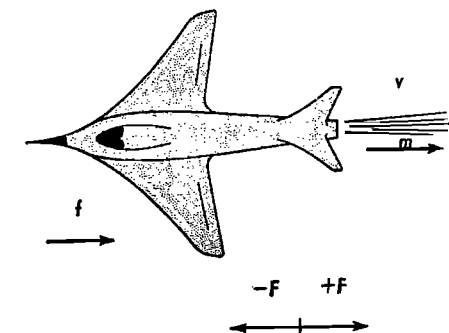


Fig. 7J. La conservación de la cantidad de movimiento justifica la fuerza impulsora en un avión o cohete retropropulsor.

Conforme se queman los gases dentro de las cámaras de combustión del motor, ejercen una gran fuerza hacia adelante, $-F$, sobre el avión, y otra fuerza igual y opuesta, $+F$, sobre los gases que escapan. Como consecuencia de la fuerza hacia atrás, los gases adquieren una velocidad muy alta, v , y una cantidad de movimiento mv . Volando a velocidad constante, el empuje hacia adelante, $-F$, equilibra la resistencia friccional, f , del aire. Para relacionar el empuje

con la cantidad de movimiento del escape, escribimos la ecuación de la fuerza:

$$F = ma$$

Para movimiento uniformemente acelerado, tenemos también

$$v = at$$

ó

$$a = v/t$$

Por sustitución directa en la ecuación de la fuerza se tiene

$$F = m \frac{v}{t}$$

ó

$$Ft = mv \quad (7i)$$

Para aplicar ésta, la *ecuación del impulso*, al motor cohete o retropropulsor, m representa la masa del gas que escapa en un número dado de segundos, t . El impulso, $F \times t$, ejercido sobre los gases, es igual y opuesto al impulso $-F \times t$, ejercido sobre el avión.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Expresa la ley de la conservación de la cantidad de movimiento. Dé un ejemplo por medio de un diagrama y explíquelo en detalle.

2. Expresa la ley de la conservación de la energía en sus propias palabras. Dé un ejemplo en que la energía potencial se transforme en energía cinética.

3. Dé un ejemplo de su propia experiencia en que la energía cinética se transforme en energía potencial.

4. ¿En qué punto de su trayectoria tiene la lenteja de un péndulo: a) su máxima rapidez; b) cero velocidad; c) máxima aceleración, y d) cero aceleración?

5. Cuando un carro baja una cuesta y se aplican los frenos para mantener su velocidad a 30 km/h, ¿qué ocurre con la energía potencial? Explíquelo.

6. Una bala de 16 lb se suelta desde una altura de 100 ft. Encontrar: a) su energía potencial antes de soltarla; b) su energía cinética 25 ft arriba del suelo, y c) la energía cinética máxima, adquirida antes de llegar al suelo.

7. Un pequeño motor cohete se monta en la popa de un bote chico, de modo que lance su escape hacia atrás. Explique las fuerzas que intervienen, y los movimientos que se esperan desde el encendido.

8. Una piedra de 5 kg es soltada desde una altura de 75 m. Encontrar: a) su ener-

gía potencial inicial; b) su máxima energía cinética, y c) su máxima velocidad.

9. Un ciclista se desliza 200 m hacia abajo de una cuesta de 10%. Despreciando la fricción, ¿cuál será su velocidad al llegar abajo? (Resp. 19.8 m/seg.)

10. Una bala de 60 g, moviéndose con una velocidad de 600 m, entra y se incrusta en un trozo de madera de 4.5 kg. ¿Con qué velocidad retrocede el trozo si estaba en reposo inicialmente?

11. Una pelota de boliche de 3 kg de masa, y moviéndose con velocidad constante de 5.4 m/seg, choca con otra bola de la misma masa y moviéndose en la misma dirección con una velocidad de 1.6 m/seg. Después del impacto, la primera masa sigue moviéndose en la misma dirección con una velocidad de 3.8 m/seg. Calcule la velocidad de la segunda masa. (Resp. 3.2 m/seg.)

12. Una masa pequeña, de 0.5 kg, moviéndose con una velocidad de 24 m/seg, choca de frente con una masa de 15 kg en reposo. Debido al impacto, la masa pesada se mueve con una velocidad de 30 cm/seg. Calcule la velocidad de la masa menor.

13. Un cañón de 500 kg, montado sobre ruedas, dispara una bala de 1.2 kg con una velocidad de salida de 650 m/seg. Calcule la velocidad de retroceso del cañón. (Resp. 1.56 m/seg.)

14. Una bala de 60 g, moviéndose con velocidad de 500 m/seg, pasa a través de un

paquete de masilla de 1.5 kg, que está inicialmente en reposo. Si la bala sale por el otro lado, con velocidad de 120 m/seg, ¿cuál es la velocidad con que va a moverse el paquete de masilla?

15. Un trozo de madera de 2 kg, apoyado en una cerca, es golpeado por una bala de rifle de 50 gm. Si la bala entra al trozo de madera con una velocidad de 580 m/seg y sale por el otro lado con una velocidad de 160 m/seg, encuentre: a) la velocidad del trozo, y b) la energía perdida por la bala al pasar a través del trozo. (Resp. a) 10.5 m/seg; b) 7 600 julios.)

16. Un vagón de ferrocarril, de 50 toneladas (cortas), moviéndose a 16 ft/seg, topa con otro de 40 toneladas, que se mueve en la misma dirección, a 5 ft/seg. Si los carros se enganchan al chocar, encuentre: a) su ve-

locidad resultante, y b) la energía perdida durante el impacto.

17. Un trozo de madera de 230 g, se coloca directamente sobre el cañón de un rifle de calibre 22. Se apunta el rifle verticalmente, hacia arriba, y se dispara. La madera, con la bala incrustada, sube a una altura de 1.6 m. Si la masa de la bala es de 1.8 g, encuentre: a) la velocidad de salida del madero, y b) la velocidad de disparo de la bala. (Resp. a) 5.60 m/seg; b) 721 m/seg.)

18. Un trozo de madera, de 4 kg, cuelga como péndulo de un cordel largo. Cuando se dispara una bala de 12 g, que se clava en el trozo de madera y se queda incrustada en él, esa madera oscila hasta una altura de 16 cm por encima de su posición de reposo. Encuentre: a) la velocidad adquirida por la madera, y b) la velocidad con que salió disparada la bala.

MOVIMIENTO CIRCULAR

· Cuando se pone en rotación un cuerpo rígido, su movimiento se describe generalmente con relación al eje en torno al cual gira. El *eje de rotación*, como se llama generalmente, está a veces dentro del cuerpo y otras veces fuera de él. En el caso de la mayoría de las ruedas de maquinaria, por ejemplo, el eje de rotación es una línea que pasa por el centro geométrico y en dirección perpendicular al plano de rotación. En cambio, para una piedra que gira en el extremo de una cuerda, el eje de rotación está en el otro extremo de ésta, el más alejado de la piedra.

8.1 Frecuencia. La velocidad con que un cuerpo gira, se expresa por su *velocidad angular*, o mejor aún, por su *frecuencia de rotación*. Este último término se refiere al número de revoluciones completas que efectúa un cuerpo en unidad de tiempo, y se expresa con la letra f .

f = número de revoluciones por seg. (8a)

Se puede decir, por ejemplo, que un volante tiene una frecuencia de 10 revoluciones por segundo (abrev. 10 rps.) Esto equivale a una frecuencia de 600 revoluciones por minuto (abrev. 600 rpm), y a una frecuencia de 36 000 revoluciones por hora (abrev. 36 000 rph).

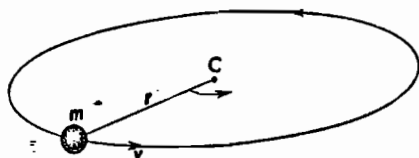


Fig. 8A. Una masa, m , se mueve en un círculo de radio r con una rapidez uniforme v .

· Considérese un cuerpo de masa m , atado al extremo de una cuerda y girando en un círculo de radio r . (Véase fig. 8A.) Ya que v , la velocidad del cuerpo a lo largo de su trayectoria se define como la distancia recorrida por unidad de tiempo, la relación entre v y f , será:

$$v = 2\pi r f \quad (8b)$$

· La distancia recorrida en un segundo es igual a la circunferencia, $2\pi r$, multiplicada por el número de revoluciones por seg., f . Si r está en centímetros, la velocidad está en *centímetros por seg.*, y si r se da en metros, la velocidad v se obtiene en metros por segundo.

Para aplicar el término *velocidad* a un movimiento circular uniforme, debemos referirnos a la *velocidad instantánea*. Esta velocidad, v , como se indica en la fig. 8B,

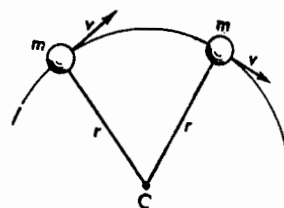


Fig. 8B. La velocidad instantánea, v , de una masa m , que sigue una trayectoria curva, tiene siempre la dirección de la tangente a la curva en ese punto.

tiene la misma magnitud que la rapidez v , y una dirección que en cualquier punto es la de la tangente al círculo. Si la rapidez es constante, la magnitud de la velocidad es constante, pero su dirección cambia continuamente.

8.2 Fuerza centrípeta. Cuando se hace girar una piedra en el extremo de una cuer-

da, hay una fuerza hacia adentro ejercida por la cuerda y actuando sobre la piedra. Esta fuerza se llama *fuerza centrípeta*. Por la tercera ley del movimiento de Newton, sabemos que la piedra ejerce una fuerza igual pero contraria sobre la cuerda. Ésta se llama *fuerza centrífuga*. Ambas fuerzas se presentan en la fig. 8C. Ya que la única fuerza que actúa sobre la piedra es hacia dentro, la piedra no está en equilibrio, sino

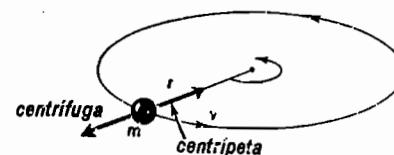


Fig. 8C. La masa m que se mueve en un círculo, tiene una aceleración hacia el centro.

que continuamente es acelerada en la dirección de esa fuerza, es decir, hacia el centro.

Esto parece ser una paradoja física, porque aquí hay un cuerpo que se mueve con rapidez constante en un círculo, y está siendo acelerado hacia el centro del círculo sin que se acerque a él. Si se rompiera bruscamente la cuerda, la piedra saldría volando en una línea tangente, de acuerdo con la primera ley del movimiento de Newton.

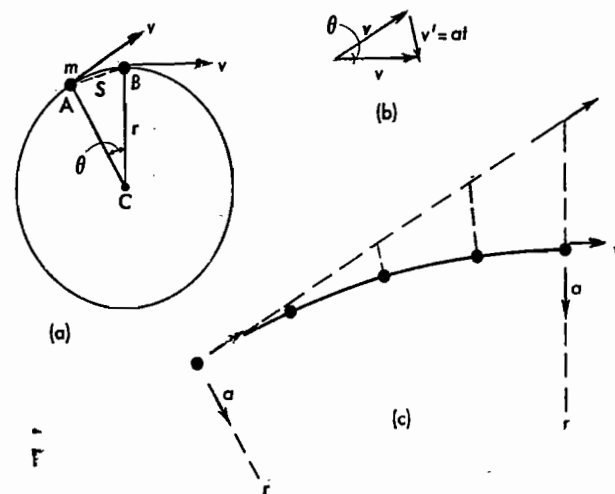


Fig. 8D. Un cuerpo que recorre un círculo, se acelera continuamente hacia el centro.

Para obtener una idea más clara de la fuerza centrípeta y de la aceleración hacia el centro, se ilustra en la fig. 8D (c) el movimiento circular comparado con el movimiento de un proyectil acelerado hacia abajo por la atracción de la gravedad, como se vio en la fig. 4G. Debido a la atracción de la Tierra sobre todos los cuerpos, un proyectil es acelerado continuamente hacia abajo, alejándolo de la línea recta en que fue lanzado originalmente. En el movimiento circular, la masa es acelerada continuamente hacia el centro, siempre en ángulo recto con su velocidad instantánea y alejándola de la recta tangente, a lo largo de la cual viajaría si bruscamente se le dejase en libertad.

En el diagrama (a) de la fig. 8D, se indica la velocidad instantánea en dos puntos, A y B. Se ve que la velocidad indicada por los vectores v , está cambiando de dirección, pero conserva su misma magnitud. El diagrama (b) es un diagrama de velocidad indicando v' como el cambio de velocidades que tiene lugar al ir de A hasta B. Ya que el triángulo de velocidades es semejante al triángulo ABC de distancias del diagrama (a), los lados correspondientes son proporcionales entre sí y se puede escribir lo siguiente:

$$\frac{d}{r} = \frac{v'}{v}$$

Como el cambio de velocidad v' se debe a una aceleración, puede reemplazarse por at , conforme a la ecuación $v = at$. Durante el tiempo t , se mueve el cuerpo desde A hasta B recorriendo una distancia $d = vt$. Para ángulos pequeños θ , la distancia medida a lo largo del arco AB es aproximadamente igual a la cuerda d , de manera que se puede reemplazar con bastante aproximación d por vt . Estas dos sustituciones, hechas en la ecuación anterior, nos dan,

$$\frac{vt}{r} = \frac{at}{v}$$

Suprimiendo la t en ambos miembros y despejando a , obtenemos la relación

$$a = \frac{v^2}{r} \quad (8c)$$

o sea, que la *aceleración centrípeta* se obtiene con v^2/r .

Conforme se hace más y más pequeño el ángulo θ de la fig. 8D, la distancia d del arco se hace más y más cercana a la cuerda, mientras que el cambio de velocidad v' , que da la dirección de la aceleración, a , se va aproximando más a la perpendicular a la velocidad v . En el límite en que θ se hace cero, la ecuación (8c) será exacta, y la aceleración resulta perpendicular a v .

La *fuerza centrípeta* se define como la fuerza constante que, actuando continuamente en ángulo recto con la dirección del movimiento de una partícula, hace que ésta se mueva en un círculo con rapidez constante. Por la segunda ley del movimiento de Newton, $F = ma$, la fuerza centrípeta está dada por

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (8d)$$

Ejemplo 1. Una masa de 5 kg se mueve con una rapidez de 6 m/seg en un círculo de 2 m de radio. Encontrar la fuerza centrípeta.

Solución. Pueden sustituirse las cantidades conocidas, directamente en la ec. (8d).

$$F = 5 \text{ kg} \frac{(6 \text{ m/seg})^2}{2 \text{ m}} = 90 \frac{\text{kg m}}{\text{seg}^2}$$

$$F = 90 \text{ newtons}$$

8.3 Demostración experimental de la fuerza centrípeta. Se pueden efectuar experimentos muy interesantes para ilustrar la fuerza centrípeta. En la fig. 8E se han puesto mercurio y agua en un recipiente y se ha hecho girar rápidamente éste en torno a un eje vertical. Por la ecuación (8d), se observa que r y v serán los mismos para el agua y el mercurio y que m es diferente. Ya que el mercurio es 13.6 veces más pesado

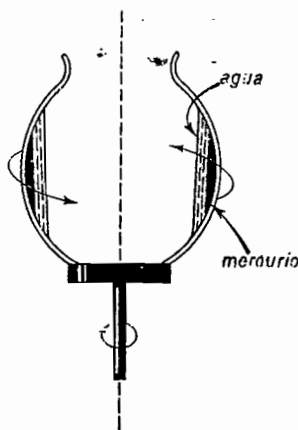


Fig. 8E. Al girar agua y mercurio juntos, el agua queda dentro del mercurio. La fuerza centrípeta, al igual que la gravitacional, es mayor para sustancias más densas.

que un volumen igual de agua, la fuerza centrípeta, F , es 13.6 veces mayor para el mercurio. Por lo tanto, el mercurio tomará la posición más alejada del eje.

Aunque con frecuencia se dice que la Tierra es esférica, en realidad es un esferoide; es decir, una esfera ligeramente achatada por los polos. Las mediciones más exactas del diámetro de la Tierra nos enseñan que el diámetro ecuatorial es 45 kilómetros más largo que el diámetro polar. La

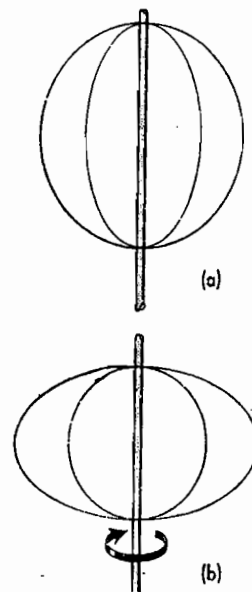


Fig. 8F. El achatamiento en los polos de la Tierra se debe a la rotación de ésta en torno a su eje.

causa de este achatamiento se ilustra con la fig. 8F, usando dos cintas metálicas circulares. El diagrama (a) muestra las cintas redondas cuando están en reposo, mientras que (b) las muestra aplanadas, debido a la rotación rápida. El aplanamiento de la Tierra se debe a su propia rotación a razón de una revolución completa cada 24 horas. La Tierra se comporta como si fuera de material suave y semiplástico debido a su enorme tamaño y a su relativa falta de rigidez.

El agua y el barro se adhieren a las ruedas de los automóviles mientras su velocidad

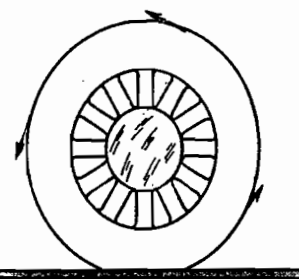


Fig. 8G. El agua y el barro se desprenden por la tangente al girar de prisa la rueda.

no llega a ser suficientemente grande; pero, cuando esto ocurre, salen disparadas por la tangente, como se ilustra en la fig. 8G. Para seguir adheridas a la rueda, se requiere que la fuerza centrípeta necesaria sea menor que la fuerza de adhesión.

La abertura de un lazo, mientras se le hace girar y se lanza, se debe a la fuerza centrípeta (véase la fig. 8H). Cada peque-



Fig. 8H. Un lazo toma forma circular al tratar de salir por la tangente cada pedazo. La fuerza centrípeta lo mantiene en forma de circunferencia.

ña sección de la cuerda, actuando como una masa independiente, tiende a salir por la tangente debido a la rotación, y por ello se mantiene lo más lejos posible del centro de la misma.

La distancia media desde el centro a todas las secciones de la cuerda será máxima cuando el lazo tome la forma de un círculo, girando en torno a un eje perpendicular al plano del lazo.

Si hacemos girar una cadena pequeña a gran velocidad, usando un motor eléctrico y luego la dejamos libre, rodará a lo largo del piso como si fuera un anillo metálico rígido, como se ilustra en la fig. 8I. Al brincar sobre obstáculos, podrá saltar al aire y

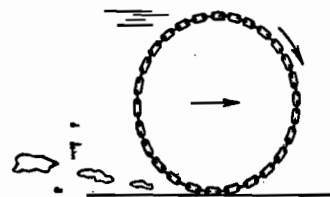


Fig. 8I. Una cadena, girando a gran velocidad, rodará como una rueda rígida.

volver a caer al suelo, reteniendo su forma circular mientras siga rodando. La rigidez de la cadena se debe a la enorme fuerza centrípeta producida por la gran velocidad angular.

8.4 Energía cinética de rotación. Un cuerpo que está en rotación, posee energía cinética. Posee esta energía debido a que, para llevarlo al reposo, tendrá que obligarse a efectuar un trabajo. Para calcular la cantidad exacta de energía almacenada en un cuerpo que gira, se necesitará tener en cuenta, no sólo la rapidez de rotación, sino la distribución de la masa con respecto al eje de rotación. En otras palabras, en la ecuación hay que tener en cuenta la forma del cuerpo. Al hacer esto, las ecuaciones que resultan son muy semejantes a las de la energía cinética para el movimiento lineal, $\frac{1}{2}mv^2$ (véase la ecuación 6i).

8.5 Cantidad de movimiento angular. Así como una masa, m , moviéndose a lo largo de una línea recta con velocidad v , tiene

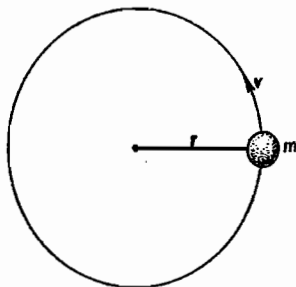


Fig. 8J. Una bola de masa m , girando en un círculo atada a una cuerda, tiene una cantidad de movimiento angular mvr .

una cantidad de movimiento mv , también una masa m , moviéndose con una velocidad v en un círculo de radio r , tiene una cantidad de movimiento angular mvr (véase la fig. 8J).

$$\text{cant. de movimiento angular} = mvr \quad (8e)$$

Ejemplo 2. Una masa de 3 kg, atada al extremo de una cuerda de 0.25 m de largo, se pone en rotación en un círculo como el de la fig. 8B. Si la frecuencia es de 4 rev/seg, encontrar la cantidad de movimiento angular.

Solución. Primero debemos encontrar la velocidad v usando la ecuación (8b).

$$v = 2\pi rf = 2 \times 3.14 \times 0.25 \text{ m} \times 4 \frac{1}{\text{seg}},$$

$$v = 6.28 \text{ m/seg.}$$

Sustituyendo la ecuación (8e), obtenemos

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de movimiento angular} &= mvr \\ &= 3 \text{ kg} \times 6.28 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 0.25 \text{ m} \\ &= 4.70 \frac{\text{kg m}^2}{\text{seg}} \end{aligned}$$

Las unidades son tan importantes y tan necesarias en esta respuesta como lo son los números que figuran con ellas, porque si se cambian las unidades, tendrán que cambiarse también los números.

8.6 Conservación de la cantidad de movimiento angular. Así como hay una ley de la conservación de la cantidad de movimiento, para los cuerpos que se mueven en línea recta, también hay una ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular para los cuerpos que están en rotación. Esta ley puede ilustrarse muy bien por el experimento que se muestra en la fig. 8K. Dos masas iguales, m , montadas en una varilla AB , capaces de girar en torno al eje vertical MN . Las cuerdas unidas a cada masa y que pasan por las poleas P , van hasta el anillo R y permiten que se pueda cambiar el radio de rotación, desde r_1 en (a), hasta r_2 en (b), por un simple movimiento de R . La articulación S evita que se tuerzan las cuerdas. Cuando se pone a girar el sistema, como se ilustra en (a) con la velocidad v_1 , la cantidad de movimiento angular de cada masa es mv_1r_1 . Al tirar del anillo R se disminuye el radio a r_2 y la rapidez cambia a v_2 , siendo la cantidad de movimiento angular mv_2r_2 .

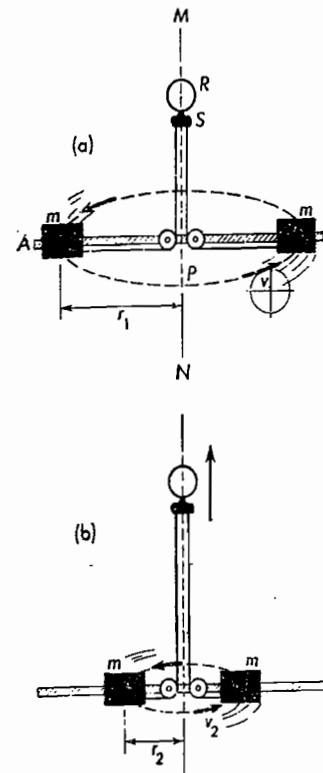


Fig. 8K. Demostración experimental de la conservación de la cantidad de movimiento angular.

La conservación de la cantidad de movimiento angular exige que

$$mv_1r_1 = mv_2r_2 \quad (8f)$$

Ya que la masa no se altera en su valor, la conservación de la cantidad de movimiento angular exige que cualquier disminución en r deba compensarse con un aumento en rapidez.

Esto es necesario para que ambos miembros de la ecuación sigan siendo iguales entre sí.

La ecuación (8f) dice que, por ejemplo, si se reduce r a la mitad, la velocidad v debe hacerse doble.

Con v doble y la circunferencia con la mitad de longitud, la velocidad angular se aumenta al cuádruplo.

Ejemplo 3. Supongamos en la fig. 8K que $m = 10\text{g}$, $v_1 = 20 \text{ cm/seg}$ y $r_1 = 16 \text{ cm}$. ¿Cuál será la nueva rapidez si el radio r_1 se reduce a la mitad de su valor, es decir, $r_2 = 8 \text{ cm}$?

Solución. Por sustitución en la ecuación (8f), obtenemos

$$\begin{aligned} 10 \text{ g} \times 20 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 16 \text{ cm} &= 10 \text{ g} \times v_2 \times 8 \text{ cm}, \\ 3200 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} &= 80 v_2 \\ v_2 &= 40 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \end{aligned}$$

Se representa en la fig. 8L un experimento muy interesante, que ilustra este mismo principio.

Un observador se coloca de pie sobre una mesa giratoria con pesas en las dos manos.

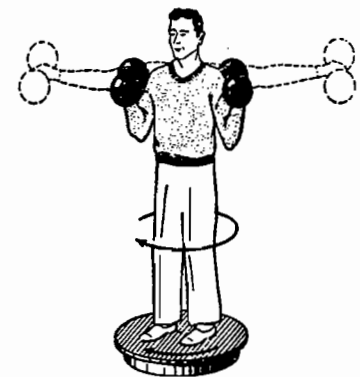


Fig. 8L. Experimento que ilustra la conservación de la cantidad de movimiento angular.

Con los brazos completamente extendidos horizontalmente se le hace girar lentamente. Al acercar las manos y las pesas hacia el pecho, como se ilustra en trazo continuo, la velocidad angular aumenta considerablemente. Este experimento se aprecia mejor por el observador que está girando y que se siente él mismo acelerado, por lo que parece ser una fuerza misteriosa.

* La energía cinética de rotación, en cada uno de estos dos experimentos, aumenta

conforme las masas se acercan hacia el centro de rotación. Este aumento se debe a que se ha tenido que hacer trabajo, fuerza por distancia, cuando se movieron hacia el centro.

Este principio se usa mucho en las figuras hechas por los patinadores sobre hielo. Empiezan a girar con los brazos extendidos, y a veces una pierna también, y luego acercan los brazos y la pierna hacia el cuerpo, obteniendo una velocidad angular mucho mayor que la obtenida antes de acercar los brazos.

8.7 Estabilidad giroscópica. Si una rueda giroscópica equilibrada se monta sobre anillos a la cardan, como se muestra en la fig. 8M, al hacerlo girar con alta velocidad,

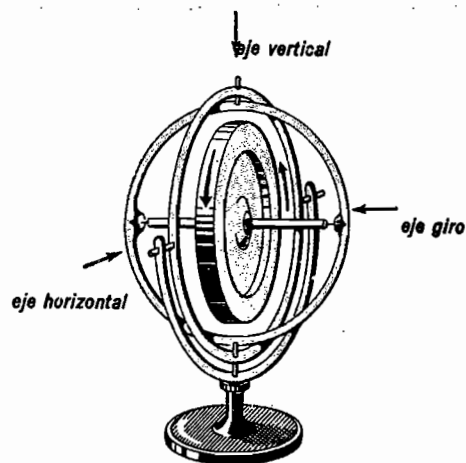


Fig. 8M. Giroscopo montado sobre los anillos a la cardan para demostrar la estabilidad giroscópica.

exhibirá una propiedad llamada *estabilidad giroscópica*. Cuando el giroscopo es levantado y movido de lugar, se puede fijar la base en cualquiera dirección sin que se logre alterar la dirección de su eje de rotación respecto a la Tierra. En otras palabras, el plano del volante del giroscopo parece haber tomado cierta rigidez en el espacio.

Para cambiar la dirección del *eje de giro* se necesita aplicar un momento de torsión

sobre el eje. El montaje sobre los anillos a la cardan tiene por objeto permitir que se mueva y gire la base en cualquier forma sin ejercer ningún momento de torsión en el volante.

La Primera Ley del Movimiento de Newton, que se refiere a la inercia de un cuerpo, tiene su equivalencia en el experimento anterior.

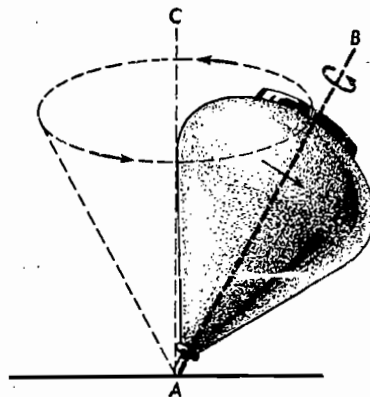


Fig. 8N. Un trompo tiene precesión en torno a un eje vertical.

Un cuerpo en rotación en torno a un eje fijo, seguirá girando en torno a ese eje con rapidez constante a menos que se le aplique un momento de torsión no equilibrado.

8.8 El trompo. Un trompo común, girando como el que se ilustra en la fig. 8N, da una buena demostración de la cantidad de movimiento angular. Es simplemente una de las muchas formas del giroscopo. Al girar en torno a su eje, el trompo tiene una precesión, alrededor de su punta, alrededor de la cual gira con su línea *AB* describiendo un cono invertido alrededor de la línea vertical *AC*. Si, visto desde arriba, el trompo gira como las manecillas del reloj, la dirección de su precesión será también como giran las manecillas del reloj; si gira contra el reloj, la precesión será contra el reloj.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente lo siguiente: a) frecuencia de rotación; b) velocidad instantánea; c) fuerza centrípeta; d) fuerza centrífuga; e) aceleración centrípeta; f) cantidad de movimiento angular, y g) energía cinética de rotación.
2. Puesto que la cuerda se mantiene abierta en una forma más o menos circular, conforme a la fig. 8H, ¿qué ocurrió a la fuerza centrípeta? Explicarlo.
3. Explicar cómo es que un satélite que está en órbita puede ser acelerado continuamente hacia la Tierra y a la vez seguir a la misma distancia por arriba de la superficie de ésta.
4. ¿Por qué no se cae un trompo que está girando, como el de la fig. 8N? Explicarlo.
5. Una bola atada a la punta de una cuerda de 100 cm de largo está girando en una circunferencia con una frecuencia de 3 rev/seg. Calcular la aceleración centrípeta. (Resp. 355 m/seg².)
6. Un vehículo de 2 000 kg viaja a 30 m/seg en torno a una curva de 400 m de radio. Calcule: a) la aceleración centrípeta, y b) la fuerza centrípeta.
7. Una masa de 500 g está atada al extremo de una cuerda y gira en una circunferencia de 120 cm de radio con una rapidez de 3 m/seg. Calcule: a) la aceleración centrípeta, y b) la fuerza centrípeta. (Resp. a) 7.50 m/seg²; b) 3.75 newtons.)
8. Un peso de 16 lb es fijado al extremo de un alambre y girando en una circunferencia de 5 ft de radio con rapidez de 24 ft/seg. Encontrar: a) la aceleración centrípeta, y b) la fuerza centrípeta.
9. Una piedra de 2 kg, en el extremo de un alambre delgado, gira en una circunferencia de 75 cm de radio con una rapidez de 6 m/seg. Calcule la cantidad de movimiento angular. (Resp. 9 kg m²/seg.)
10. Una masa de 4 kg gira a 5 rev/seg en una circunferencia de 50 cm de radio. Calcule la cantidad de movimiento angular.
11. Dos piedras, de 4 lb cada una, están atadas en los extremos de un alambre de 4 ft de largo. Este sistema es lanzado al aire girando con una frecuencia de 240 rev/min. Calcule la tensión sufrida por el alambre. (Resp. 158 lb.)
12. Calcule la aceleración de un cuerpo hacia el centro de la Tierra si se deja libre desde una nave espacial a 8 000 millas sobre la superficie de la Tierra. Tome el radio de la Tierra como 4 000 mi.
13. Calcule la aceleración de la Luna hacia la Tierra suponiendo su distancia desde el centro de la Tierra como 240 000 mi. Tome el radio de la Tierra de 4 000 mi. (Resp. 0.00889 ft/seg².)

MOVIMIENTO PLANETARIO Y SATELITES

Conforme con la historia de la astronomía, fue el antiguo filósofo griego, Pitágoras (530 (a.C.)), quien dijo: "El mundo es redondo y cuelga en el espacio." "La Tierra —dijo él— no está quieta, sino que gira en torno al fuego central, llamado Hestia. Este fuego no es el Sol, pues el Sol es iluminado, como los planetas, por los reflejos del Hestia."

Esta idea quedó adormecida durante dos mil años, antes de que Copérnico dijera, a principios del siglo XVI: "El Sol está quieto, y la Tierra y los planetas se mueven en órbitas que lo rodean." La prueba matemática observada de que todos los planetas se mueven en órbitas elípticas fue presentada por primera vez, en 1609, cuando John Kepler * publicó un libro que contenía dos de sus tres leyes conocidas ahora como las Leyes de Kepler del Movimiento Planetario.

9.1 Primera Ley de Kepler. *Los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol en uno de sus focos.*

* John Kepler (1571-1630), astrónomo y filósofo alemán, nacido en Weil en una pobre, pero noble familia, se educó en la Universidad de Maulbronn. Fue en su cargo de profesor de astronomía, en Gratz, donde primero se interesó en los planetas. Al enterarse de que Tycho Brahe había registrado gran cantidad de datos sobre los movimientos de cientos de cuerpos estelares, Kepler fue a Praga. Allí se convirtió en un íntimo y leal amigo de Tycho Brahe, y le prometió a este gran anciano que él tabularía y publicaría las observaciones realizadas por él. En 1609, Kepler publicó sus *Comentarios sobre Marte*, en que se encuentran sus dos primeras leyes del movimiento planetario. La tercera ley vino un poco después. Kepler, un hombre religioso, estuvo enfermo la mayor parte de su vida, de 59 años. Se casó dos veces, pero nunca tuvo hijos. Murió sin un centavo.

Se puede construir una elipse fijando los dos extremos de un trozo de cuerda a dos clavos, F_1 y F_2 , como se ve en la fig. 9A. Manteniendo la cuerda tensa, y con un lápiz en el punto P , se puede recorrer el arco

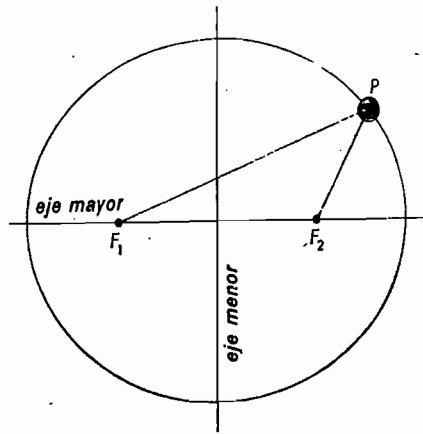


Fig. 9A. Una elipse puede dibujarse con dos clavos, una cuerda y un lápiz.

completo en derredor, de modo muy parecido a como se dibuja un círculo con un compás.

Si la longitud de la cuerda se mantiene sin cambios, y los focos F_1 y F_2 se acercan uno a otro, los ejes menor CD y mayor AB se van pareciendo más entre sí y, en el límite, cuando los focos coinciden, los ejes son iguales y la elipse se convierte en circunferencia. Las órbitas reales de los planetas son tan cercanas a una circunferencia que, si se dibujan con un compás, la elipse diferiría de la circunferencia por menos de lo que tendría de grueso la línea del lápiz.

MOVIMIENTO PLANETARIO Y SATELITES

La excentricidad e de una elipse (ver fig. 9B) se define como la relación entre la distancia SQ y la AQ .

$$e = \frac{SQ}{AQ} \quad (9a)$$

donde AQ es la mitad del eje mayor, a , y SQ es igual a ae . Con el Sol en un foco, la

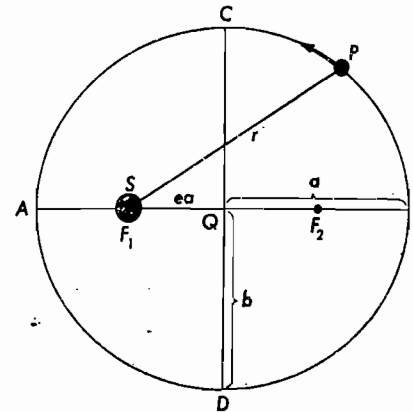


Fig. 9B. Órbita elíptica con una excentricidad $e = 0.5$.

distancia de mayor acercamiento AS se llama perigeo, y la distancia máxima, BS , se llama apogeo. Un poco de estudio de la fig. 9B permitirá al lector encontrar que

$$\text{apogeo} = a(1 + e) \quad (9b)$$

$$\text{perigeo} = a(1 - e) \quad (9c)$$

$$\text{semieje menor} = a\sqrt{1 - e^2} \quad (9d)$$

9.2 Segunda Ley de Kepler. *La línea recta que une al Sol y cualquier planeta, barre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales.*

Como se ve en la fig. 9C, la línea recta a que se refiere, llamada el radio vector, varía su longitud desde el mínimo en el perigeo hasta el máximo en el apogeo. Aunque la órbita de la Tierra es casi una circunferencia, los números 1, 2, 3, 4, etc., corresponden a la posición de la Tierra al final de cada uno de doce meses iguales.

Para cubrir estas distancias desiguales en intervalos iguales de tiempo, la rapidez debe

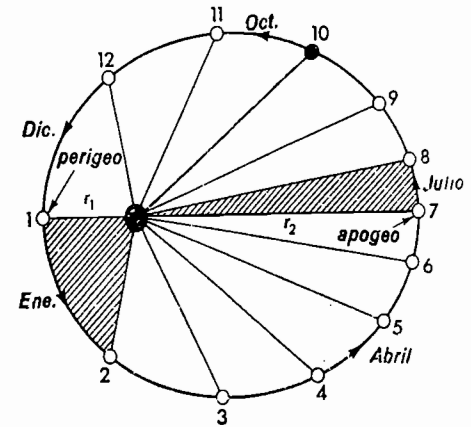


Fig. 9C. Órbita elíptica de un planeta o satélite, mostrando áreas iguales, barridas por el radio vector en intervalos iguales de tiempo.

tener un máximo en el perigeo y un mínimo en el apogeo, seis meses después. Durante los períodos 1 a 2 y 7 a 8, por ejemplo, las áreas barridas por la recta son iguales.

Conforme la Tierra se mueve a lo largo de su órbita en septiembre, octubre, noviembre, etc., la fuerza de atracción del Sol le hace que se acelere. Al llegar al perigeo, a fines de diciembre, su rapidez es máxima, y demasiada para mantenerse a esta distancia, r_1 , del Sol. Durante los meses de marzo, abril, mayo, etc., la Tierra se aleja del Sol, y la fuerza de atracción de éste, le hace ir más despacio. Al llegar al apogeo, a fines de junio, su rapidez es mínima, y es demasiado lenta para conservar la distancia, r_2 , del Sol. La distancia media del Sol es de 149 500 000 kilómetros (92 900 000 millas), mientras que la rapidez media de la Tierra es de 29.6 km/seg (18.5 mi/seg).

9.3 Tercera Ley de Kepler. *El cuadrado del período orbital de los planetas es proporcional al cubo de sus distancias medias al Sol.*

El período T de un planeta, o satélite, se define como el tiempo que requiere para efectuar un viaje completo en su órbita y la distancia media, r , es definida como la distancia promedio medida desde el Sol. Se

TABLA 9A. CARACTERÍSTICAS MEDIDAS DE LOS PLANETAS

Nombre	Período T (años)	Distancia media		$\frac{T^2}{r^3}$	Radio medio		Masa ($\text{kg} \times 10^{24}$)
		($\text{mi} \times 10^6$)	($\text{km} \times 10^6$)		(mi)	(km)	
Mercurio	0.241	36.0	57.9	1.245	1504.3	2421.1	0.3244
Venus	0.615	67.1	108.1	1.252	3828.2	6161.0	4.861
Tierra	1.000	92.9	149.5	1.247	3958.9	6371.0	5.975
Marte	1.881	141.5	227.8	1.249	2070.5	3332.1	0.6387
Júpiter	11.862	483.3	777.8	1.246	43429.0	69892.0	1902.1
Saturno	29.458	886.1	1426.0	1.247	35748.5	57532.0	569.4
Urano	84.015	1783.0	2869.0	1.245	14727.0	23701.0	87.1
Neptuno	164.790	2793.0	4496.0	1.246	13381.0	21535.0	103.1
Plutón	247.700	3665.0	5899.0	1.246	1781.4	2867.0	0.5 ?

proporcionan datos importantes sobre los ocho planetas mayores del sistema solar en la Tabla 9A. La relación constante T^2/r^3 de la cuarta columna verifica la Tercera Ley de Kepler.

Aunque las leyes de Kepler se derivaron originalmente de las cuidadosas observaciones de Tycho Brahe, pueden derivarse di-

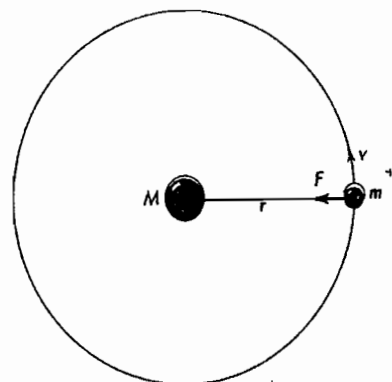


Fig. 9D. La fuerza gravitacional de atracción F es la fuerza centrípeta que mantiene a la Tierra en su órbita, casi circular, en torno al Sol.

rectamente de las leyes de la mecánica clásica.

Para mayor sencillez, vamos a considerar la órbita de la Tierra circular, como en la fig. 9D. En este diagrama, M es la masa del Sol, m es la masa de un planeta, como la Tierra, y r es la distancia entre sus cen-

tros. La fuerza centrífuga, F , como la da la ec. (8d), es precisamente la fuerza de atracción gravitacional dada por la ecuación (4c). Éstas son:

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (9e)$$

Fuerza centrípeta

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (9f)$$

Ley de Gravitación de Newton

donde

$$G = 6.66 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg seg}^2}$$

9.4 Vuelo en el espacio. Cuando un gran cohete despegue de la Tierra para llevar un vehículo al espacio, su dirección inicial de arranque es vertical, hacia arriba, como se muestra en la fig. 9E. Conforme el cohete gana altura, se usan aletas o cohetes laterales de control para hacerlo girar lentamente hacia una trayectoria horizontal.

El primer norteamericano que fue lanzado al espacio por un cohete fue transportado por un cohete Redstone desde Cabo Kennedy, Florida, el 5 de mayo de 1961. El astronauta, Alan Shepard, tripuló la cápsula espacial a presión, en la cual fue lanzado.

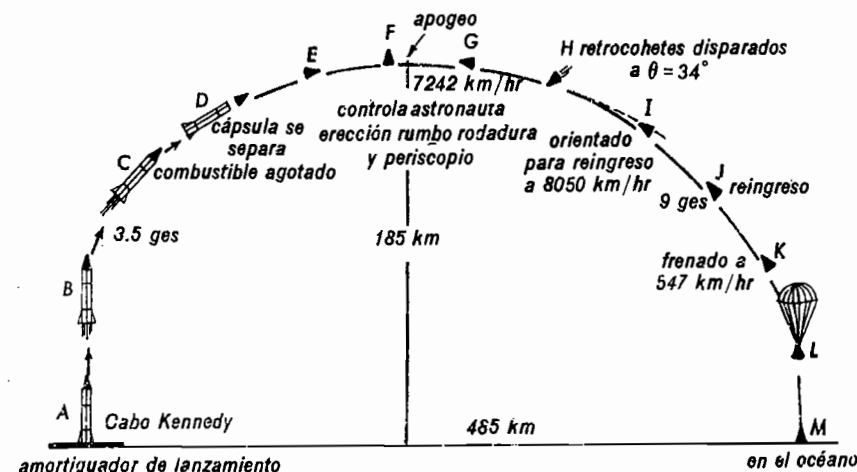


Fig. 9E. Diagrama de la trayectoria de vuelo seguida por el primer astronauta norteamericano lanzado al espacio el 5 de mayo de 1961.

Aunque los detalles de este acontecimiento histórico no se darán aquí,* se presentará el análisis de algunas de las fuerzas, velocidades y aceleraciones a que fueron sujetos el astronauta y su cohete en varios puntos de su vuelo. Los casos siguientes son típicos del vuelo espacial en general, y las ecuaciones pueden aplicarse igualmente, bien a satélites en órbita o bien a futuros vuelos a la Luna o los planetas.

Ya que los valores de g en el vuelo de Shepard disminuyeron menos del 5% a una altura de 185 km, y su dirección cambió en menos de 5 grados en su vuelo de 465 km de alcance, se supondrá que, para una primera aproximación, g se mantiene constante durante todo el recorrido del vuelo.

Caso A. Antes del lanzamiento vertical. Cuando todo el montaje del cohete está en reposo sobre el amortiguador de lanzamiento, un instante antes de despegar, todas las velocidades y aceleraciones son cero y todas las fuerzas están equilibradas. Ver la fig. 9F. En este momento hay dos fuerzas iguales actuando sobre el cohete, W

la atracción hacia abajo producida por la Tierra y P el empuje hacia arriba del amortiguador de lanzamiento. La fuerza hacia abajo es dada por

$$W = Mg \quad (9g)$$

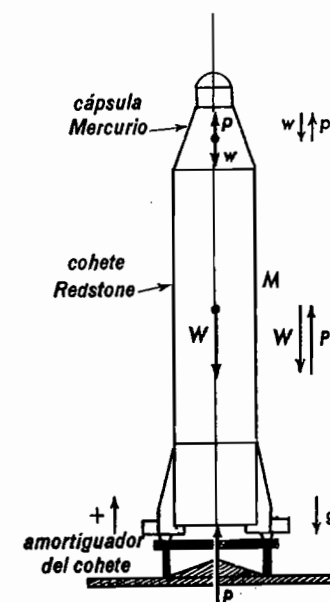


Fig. 9F. Diagrama de un cohete y su cápsula espacial con tripulante, en reposo sobre su amortiguador de lanzamiento y listo para el arranque vertical.

* Para detalles del vuelo espacial de Alan Shepard, ver el magazine Life de 12 y 19 de mayo de 1961 (o Life en Español, de fechas posteriores, pero próximas.)

donde M es la masa total del cohete y su carga.

Tomando como positiva la dirección hacia arriba, g , la aceleración debida a la gravedad, es negativa, y también lo es W . Ya que la fuerza hacia arriba, P , es ejercida sobre M , la masa total debe ser igual en magnitud a W .

$$P = Mg \quad (9h)$$

En modo semejante, las dos fuerzas iguales y opuestas que actúan sobre el astronauta son w , la atracción hacia abajo producida por la Tierra, y el apoyo hacia arriba de su cuna de soporte. Estas fuerzas son dadas por

$$w = mg \quad (9i)$$

$$p = mg \quad (9j)$$

Nótese que por cada kilogramo de masa de la estructura del cohete, o de su conte-

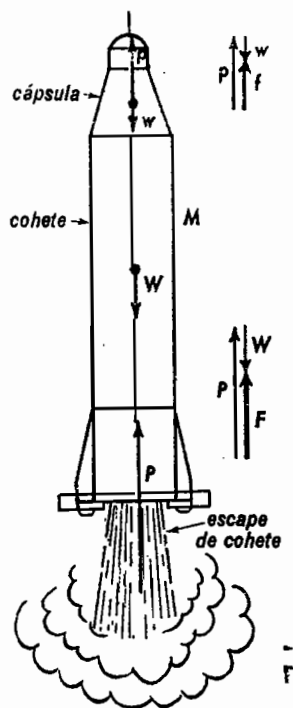


Fig. 9G. Diagrama de fuerzas de un cohete y su piloto astronauta durante el vuelo vertical, sufriendo el empuje del cohete.

nido, la fuerza p es igual a 9.8 newtons, y por cada slug de masa es de 32 libras. Bajo estas condiciones, el cohete y el astronauta se dice que están soportando 1 g.

Caso B. Ascenso vertical. Cuando el cohete está acelerando verticalmente hacia arriba, después del despegue (ver la figura 9G), las dos fuerzas que actúan sobre la masa total M son: P , el impulso hacia arriba de los motores del cohete, y W , el tirón hacia abajo, debido a la Tierra. La fuerza resultante, F , que actúa sobre el cohete es dada por

$$F = P - W \quad (9k)$$

Para levantar un cohete de la Tierra, P debe ser mayor que W , y su resultante vectorial, F , es la fuerza que produce la aceleración hacia arriba a .

$$F = Ma \quad (9l)$$

Aplicando estos mismos principios al astronauta dentro de la cápsula de la parte superior de la fig. 9G, observamos que

$$f = p - w \quad (9m)$$

donde p es el empuje de la cuna sobre el cuerpo del astronauta, y w es el tirón hacia abajo, que la Tierra ejerce sobre la misma masa; la resultante f es la fuerza que da al astronauta la misma aceleración hacia arriba que tiene el cohete.

$$f = ma \quad (9n)$$

Ejemplo 1. Un cohete de 25 toneladas cortas y un astronauta de 160 libras a bordo, van subiendo verticalmente con una aceleración de 96 ft/seg^2 . Encontrar la fuerza total que hace la cuna sobre el cuerpo del hombre: a) en ges , y b) en libras.

Solución. Despejando en la ec. (9m), obtenemos el empuje

$$p = w + f$$

y sustituyendo mg por w de la ec. (9i), y ma por f de la ec. (9n), obtenemos

$$p = mg + ma \quad (9o)$$

Tomando $g = 32 \text{ ft/seg}^2$, el astronauta tiene una aceleración hacia arriba de 96 ft/seg^2 , que es justamente $3 \times g$.

$$a = 3g \quad (9p)$$

Por sustitución directa de $3g$ por a en la Ec. (9o), nos da para el empuje

$$p = mg + m(3g)$$

6

$$p = m(4g) \quad (9q)$$

Resp. a) Se dice que el astronauta está soportando 4 ges . Esto significa que todas las partes de su cuerpo están sujetas a una fuerza cuatro veces mayor que su peso normal.

Para encontrar el empuje en libras, la sustitución directa en la ec. (9q) nos da

$$p = \frac{160 \text{ lb}}{32 \text{ ft/seg}^2} (4 \times 32 \text{ ft/seg}^2)$$

$$p = 5 \text{ slugs} \times 128 \text{ ft/seg}^2$$

$$p = 640 \text{ lb}$$

Resp. b) El peso aparente del astronauta es cuatro veces su peso normal.

Caso C. Cápsula libre después de impulsarla con cohetes. Después de que la cápsula, llevando al astronauta, ha sido desprendida del cohete, como se ve en D de la fig. 9E, el vehículo se convierte en un proyectil libre. Desde el punto D al punto

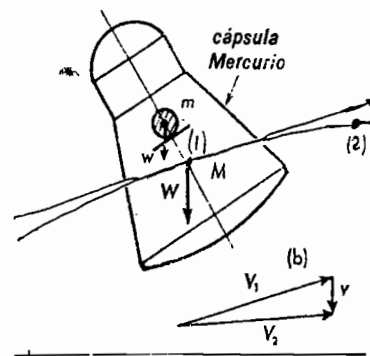


Fig. 9H. Diagrama de una cápsula espacial, después de lanzada al ir viajando sin empuje de cohete a lo largo de su ruta de vuelo.

H, donde se disparan los retrocohetes, la atracción de la Tierra W hacia abajo, es la única fuerza que actúa sobre el cuerpo. Esta fuerza da origen a una aceleración hacia abajo, g , y es responsable por la continua variación de dirección de la nave al ir recorriendo su ruta de vuelo.

En el diagrama de velocidades, Fig. 9H (b), V_1 representa la velocidad instantánea de la cápsula al pasar por el punto (1), v es el cambio de velocidad impartido por W durante el tiempo que tarda en llegar al punto (2), y V_2 es la velocidad instantánea al pasar por el punto (2).

$$v = gt$$

Ya que no hay empuje P de los motores del cohete durante esta parte del viaje, la cuna ejerce cero fuerza sobre el astronauta, y el astronauta ejerce cero fuerza sobre la cuna. Ya que la cápsula, el astronauta y la cuna caen con la misma aceleración g , el concepto de ingravidez prevalece para todo el sistema en movimiento.

9.5 Satélites. Si la velocidad con que se lanza una cápsula espacial es suficientemente grande, el vehículo se pondrá en órbita en torno de la Tierra como un satélite. Para encontrar la velocidad requerida para girar en torno de la Tierra, considérense los detalles de la fig. 9I. Imagínese que todos los vehículos son lanzados en dirección horizontal desde cierto punto más arriba de la atmósfera terrestre. Con una velocidad inicial baja, el proyectil seguirá la trayectoria casi parabólica, mostrada como A. A una velocidad algo mayor, la trayectoria

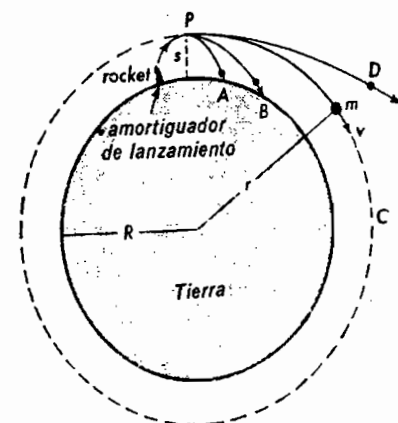


Fig. 9I. Lanzado en una dirección horizontal por encima de la superficie de la Tierra con una gran velocidad v , un vehículo espacial m la rodeará describiendo una circunferencia.

será la marcada como B . A una velocidad aún mayor, al caer el proyectil hacia la Tierra, seguirá una ruta circular de radio r . Esta velocidad particular se llama velocidad orbital. A velocidades aún mayores, como la que se muestra en D , el proyectil seguirá una trayectoria elíptica o escapará completamente de la Tierra.

Por la Ley de Newton de la Gravitación, ec. (4c), la fuerza F , ejercida por la Tierra sobre un satélite de masa m , es inversamente proporcional a r^2 , y por la Segunda Ley del Movimiento de Newton, ec. (3a), la fuerza es proporcional a a . Se deduce, por lo tanto, que la aceleración de una masa m hacia la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia desde el centro de la Tierra.

Transformando esta relación en símbolos algebraicos, podemos escribir la siguiente proporcionalidad inversa con el cuadrado

$$\frac{a}{g} = \frac{R^2}{r^2} \quad (9r)$$

donde a es la aceleración, hacia adentro, de la masa m a cualquier distancia r , y g es su aceleración hacia adentro en la superficie de la Tierra, R . Pasando g al otro miembro, obtenemos

$$a = g \frac{R^2}{r^2} \quad (9s)$$

Esta aceleración hacia adentro de un satélite en órbita es simplemente la aceleración centrípeta requerida para mantenerlo en ella y evitar que se escape por la tangente. Por la ec. (8c), tenemos,

$$a = \frac{v^2}{r}$$

Iguando estas dos relaciones, obtenemos

$$\frac{v^2}{r^2} = g \frac{R^2}{r^2}$$

la cual al despejar v , resulta simplemente

$$v = \sqrt{g \frac{R^2}{r}} \quad (9t)$$

velocidad orbital

Si la órbita es muy próxima a la superficie de la Tierra, podemos escribir, como primera aproximación, $r = R$, y la ecuación (9t) se vuelve

$$v = \sqrt{gR} \quad (9u)$$

(La aceleración debida a la gravedad, $g = 9.8 \text{ m/seg}^2$ es equivalente a $133,490 \text{ km/h}^2$.)

Para que escape un satélite de la Tierra y nunca regrese, debe ser lanzado con una velocidad cerca del 40% mayor que la necesaria para ponerlo en órbita. La velocidad de escape se da con

$$v = \sqrt{2gR} \quad (9v)$$

velocidad de escape

Ejemplo 2. Si el radio de la Tierra es 6360 km, ¿qué velocidad horizontal debe impartirse a un satélite para hacerlo orbitar en un círculo a 800 km (cerca de 500 mi) sobre la superficie terrestre?

Solución. Ya que la aceleración debida a la gravedad es $g = 9.8 \text{ m/seg}^2$, la sustitución directa en la ec. (9t) nos da

$$v = \sqrt{\frac{9.8 \times (6360000)^2 \text{ m}^2}{7160000 \text{ seg}^2}}$$

$$v = \sqrt{55.4 \times 10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}^2}}$$

$$v = 7450 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Esto equivale a 25 920 km/h (16 700 millas/h.)

9.6 Modelo mecánico de pozo. Las secciones anteriores de este capítulo muestran que, hablando en modo figurado, en la superficie de la Tierra estamos viviendo en el fondo de un pozo gravitacional, de miles de kilómetros de profundidad. Para llegar a la Luna, los planetas, u otros mundos, debemos salir fuera del pozo al plano horizontal que llamamos espacio libre sin gravedad.

Hemos visto en la Sec. 6.5 que el trabajo hecho al levantar un cuerpo de masa m a una altura s lo da el producto de la fuerza por la distancia,

$$\text{trabajo} = F \times s$$

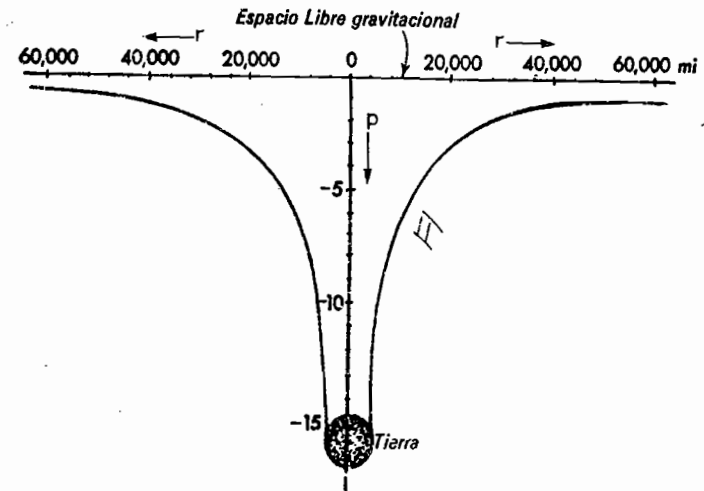


Fig. 9J. Gráfica de energía potencial, ilustrando la analogía del pozo para el campo gravitacional de la Tierra.

donde F , la fuerza, es dada por la Segunda Ley de Newton, $F = mg$,

$$\text{trabajo} = mgs \quad (9w)$$

Además, debido a su posición sobre su punto de partida, un cuerpo ha ganado energía potencial mgs .

$$\text{E.P.} = mgs \quad (9x)$$

Al aplicar esta fórmula al levantamiento de un cuerpo, se comprueba que la fuerza

necesaria se mantiene constante. Esta suposición no se justifica a grandes distancias, ya que la atracción de la Tierra disminuye con el cuadrado de la distancia. Ver ecuación (9f).

Si usamos la Ley de Gravitación Universal, de Newton, ec. (9f), para la fuerza y obtenemos, mediante el cálculo, la energía potencial de una masa m a distancia creciente sobre la Tierra, obtenemos,

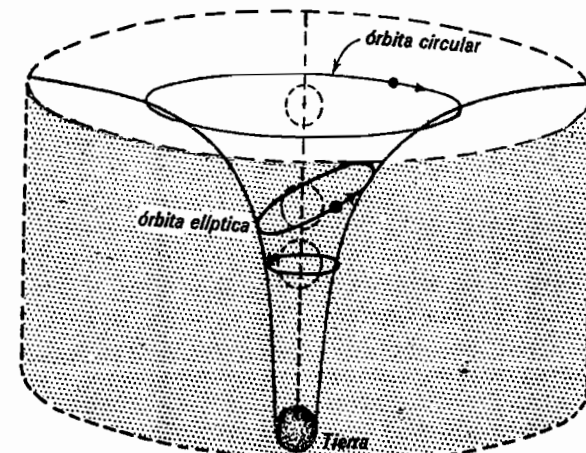


Fig. 9K. Modelo mecánico de pozo para demostrar las órbitas elípticas y circulares.

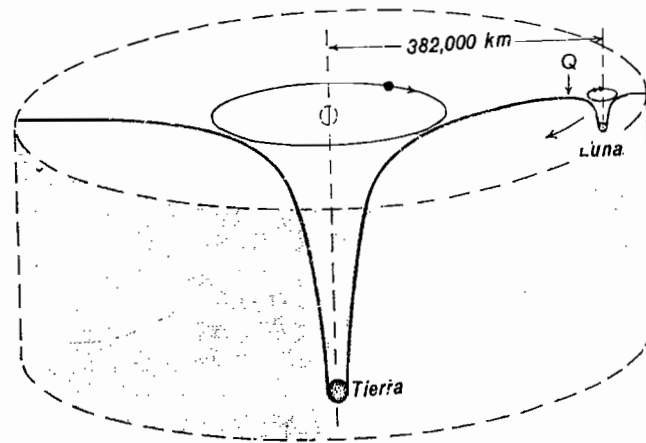


Fig. 9L. Modelo mecánico de pozo para la Tierra y la Luna.

$$E.P. = -G \frac{Mm}{r} \quad (9y)$$

donde M es la masa de la Tierra y r es la distancia desde el centro de ella.

Al derivar esta ecuación, se supone que el plano base, o de cero energía, desde donde se mide la energía potencial, es el espacio libre sin gravitación a cientos de millones de kilómetros (infinito) de la Tierra. El signo negativo significa que la energía potencial es negativa con respecto al plano base.

Para ver por qué hablamos de un pozo, expresamos gráficamente la ec. (9y) y obtendremos una gráfica de energía potencial, como se ve en la fig. 9J. La energía potencial $E.P.$ se graficó verticalmente y la distancia r , desde el centro de la Tierra, horizontalmente. (Para $r = 4\,000$ mi, GMm se estableció arbitrariamente en 64 000.)

Para una distancia r , que esté infinitamente lejos, $E.P. = 0$. A distancias menores cada vez, la $E.P.$ aumenta, pero es negativa. La curva roja del diagrama, baja hacia la superficie de la Tierra, donde r tiene el valor del radio de ella R .

El modelo mecánico de pozo para demostrar las órbitas de satélites, se obtiene gi-

rando esta gráfica de energía potencial en torno a su eje vertical. Al hacer esto, la curva describe una superficie parecida a un cono, como se muestra en la fig. 9K. Si hacemos un cuerpo sólido de algún material duro con la forma de la sección sombreada, una canica de vidrio o acero puede rodarse en el interior del cono para que describa las órbitas de satélites.

Se pueden generar una gran variedad de órbitas, simplemente variando la velocidad inicial de la canica. Cuando son vistas directamente desde arriba, la mayoría de las órbitas son elípticas o circulares. La distorsión de las órbitas, producida por la fricción al rodar, puede mantenerse en un mínimo, usando materiales duros con superficies tersas.

Si se desean órbitas que incluyan a la Luna, puede hacerse un pequeño cráter de potencial, retirado hacia la periferia del modelo de la Tierra. Ver la fig. 9L. El rodar de una canica hacia este cráter, lejos de la Tierra, es análogo a la trayectoria de un satélite lanzado de la Tierra en su viaje proyectado hacia la Luna o en torno de ella. En el punto alto, Q , las atracciones gravitacionales de la Tierra y la Luna son iguales y opuestas.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Exprese la primera ley de Kepler, del movimiento planetario. Dibuje una elipse con dos alfileres y un trozo de cuerda y señale el eje mayor, el eje menor, los focos, el perigeo y el apogeo.

2. Exprese la segunda ley de Kepler, del movimiento planetario. Dibuje una elipse con dos alfileres y un trozo de cuerda y muestre el significado de la segunda ley mediante áreas sombreadas.

3. Exprese la tercera ley de Kepler, del movimiento planetario. Dibuje tres elipses mediante dos alfileres y un trozo de cuerda. Use la misma longitud de cuerda, pero cambien la distancia entre los alfileres. ¿Qué puede decir acerca de las excentricidades?

4. Haga un diagrama a escala, mostrando una cápsula espacial rodeando a la Tierra por un círculo a 1 600 kilómetros por encima de su superficie. Si se disparan retrocohetes para reducir levemente la velocidad, ¿cuál será la forma de la nueva órbita?

5. Trace una gráfica de la energía potencial de una masa m al salir del planeta Marte. Tome el radio del planeta como 2 000 mi y el producto $GMm = 32\,000$.

6. Un satélite tiene un semieje mayor de 10 000 mi, y un semieje menor de 5 000 mi. Encontrar: a) la excentricidad; b) el apogeo, y c) el perigeo.

7. Una cápsula espacial se mueve en una órbita que tiene un semieje mayor de 20 000 km y un semieje menor de 10 000 km. Encontrar: a) la excentricidad; b) el apogeo, y c) el perigeo. (Resp. a) 0.866; b) 37 320 km, y c) 2 680 km.)

8. Un cohete de 20 toneladas cortas, con un astronauta de 140 lb a bordo, va subiendo verticalmente, con una aceleración de 112 ft/seg². Encontrar: a) el empuje del cohete en toneladas cortas, y la fuerza sufrida por el cuerpo del astronauta; b) en ges, y c) en libras.

9. Calcule el empuje total del motor del cohete del ejemplo 1 en la Sección 9.4, caso

B: a) en ges; b) en libras, y c) en toneladas. (Resp. a) 4 ges; b) 200 000 lb, y c) 100 ton.)

10. Un cohete de 30 ton cortas con un astronauta de 120 lb a bordo, va subiendo con una aceleración de 144 ft/seg². Calcular la fuerza total de la cuna sobre el cuerpo del hombre: a) en ges, y b) en libras.

11. Un cohete de 25 000 kg, con un astronauta de 60 kg a bordo, está subiendo verticalmente. Si el astronauta experimenta un peso aparente cinco veces su peso normal, encontrar: a) la aceleración vertical; b) el empuje de los motores del cohete, y c) el peso aparente del astronauta. (Resp. a) 39.2 m/seg²; b) 1 225 000 newtons, y c) 2 940 newtons.)

12. Un cohete de 20 000 kg, con un astronauta de 70 kg a bordo, está sometido a un empuje total de sus motores con su eje inclinado a un ángulo de 30° con la horizontal. Si el piloto encuentra que su peso aparente es dado por 5 ges, encontrar: a) el peso real del astronauta; b) el empuje de la cuna contra su cuerpo, y c) la dirección de la fuerza resultante f , que actúa sobre el cuerpo del astronauta.

13. Si cuelga una masa grande de un alambre, como un péndulo, dentro de la cápsula espacial de las figs. 9F, 9G y 9H, ¿en qué dirección colgará en cada caso?

14. Queremos que un satélite tome una órbita a una altura de 141 mi. Calcular: a) su rapidez, y b) su período de revolución en minutos.

15. Queremos que un satélite tome una órbita a 1 000 mi de la superficie de la Tierra. Calcular: a) su rapidez, y b) su período de revolución en minutos. (Resp. a) 15 800 mi/h, y b) 118.3 min.)

16. Un satélite viaja en órbita a 441 mi sobre la superficie de la Tierra. Encontrar: a) su rapidez, y b) su período en minutos.

17. a) ¿Cuál debe ser la rapidez de un satélite si ha de tomar una órbita a 800 mi sobre la superficie de la Tierra? b) ¿cuál ha

de ser su período? (Resp. a) 16 200 mi/h; b) 111.6 min.)

18. ¿Cuánta energía debe darse a un proyectil cohete de 100 kg para llevarlo de la superficie de la Tierra al espacio libre de gravitación?

19. Se ha de poner un cohete de 1 000 kg en órbita a 1 000 km sobre la superficie de la Tierra. Calcular: a) su energía potencial; b) su energía cinética, y c) la energía total

necesaria para ponerlo en órbita. (Resp. a) 8.47×10^9 julios; b) 26.64×10^9 julios, y c) 35.11×10^9 julios.)

20. Encontrar la velocidad de escape para un proyectil que abandone la superficie de Marte.

21. Encontrar la velocidad de escape de un proyectil que abandone la superficie de Júpiter. (Resp. 6.02×10^4 m/seg.)

10

TEORIA ATOMICA DE LA MATERIA

Al estudiar las propiedades físicas de la materia, es conveniente dividir a las sustancias en sus tres formas o estados: 1) el estado sólido, 2) el estado líquido, y 3) el estado gaseoso. Se puede hacer que la mayoría de las sustancias tomen cualquiera de estos tres estados, simplemente por cambios de su temperatura.

La teoría atómica de la materia considera que toda la materia del Universo está formada por cuerpos ultramicroscópicos, llamados átomos y que en todo momento éstos están en rápido movimiento. La naturaleza de este movimiento y su actividad dependen de la temperatura y del estado de la materia en cuestión, así como de la clase de átomos que la forman.

10.1 Clases de átomos. Aunque hay miles de sustancias diferentes conocidas en el mundo científico, se encuentra que todas están compuestas de una o más clases de átomos, cuando se descomponen en sus más pequeñas partes componentes. Una sustancia que contiene sólo átomos de una clase, se llama *elemento*, mientras que aquellas que contienen más de una clase de átomos, se denominan *compuestos* o *mezclas*. Son ejemplos de elementos, el hierro, cobre, aluminio, platino, mercurio, hidrógeno y helio; mientras que el agua, sal, bronce, madera y aire, son ejemplos de compuestos y mezclas.

En la Tabla 10A se dan los nombres técnicos y abreviaturas químicas de algunos de los elementos más conocidos. En el apéndice se da una tabla completa de los elementos, que son casi un centenar.

Se acostumbra asignar dos números para cada elemento, uno llamado número atómico y el otro peso atómico. El número atómico, dado a la izquierda de las tablas,

TABLA 10A. ALGUNOS ELEMENTOS QUÍMICOS

Núm. atómico	Elemento	Símbolo	Peso atómico
1	hidrógeno	H	1.0078
2	helio	He	4.004
3	litio	Li	6.940
4	berilio	Be	9.02
6	carbono	C	12.01
7	nitrógeno	N	14.01
8	oxígeno	O	16.000
10	neón	Ne	20.183
13	aluminio	Al	26.97
26	hierro	Fe	55.84
29	cobre	Cu	63.57
47	plata	Ag	107.88
50	estaño	Sn	118.70
78	platino	Pt	195.23
79	oro	Au	197.2
80	mercurio	Hg	200.61
82	plomo	Pb	207.18
88	radio	Ra	225.95
92	uranio	U	238.17
94	plutonio	Pu	239.18

especifica la posición que ocupa el elemento con respecto a los demás, mientras que el peso atómico, dado a la derecha, nos proporciona el peso promedio de un átomo de ese elemento en relación con el de un átomo de oxígeno, al cual se da el valor 16. Sobre esta base, el elemento más ligero conocido,

el átomo de hidrógeno, tiene un peso promedio muy próximo a la unidad.

Para ilustrar la pequeñez de los átomos, veamos la masa en gramos y el diámetro aproximado en centímetros para el elemento más ligero, el hidrógeno, y para uno de los más pesados, plutonio, y que son como sigue:

1. hidrógeno	$\left\{ \begin{array}{l} \text{masa} = 1.66 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ \text{diámetro} = 1 \times 10^{-10} \text{ m} \end{array} \right.$
94. plutonio	$\left\{ \begin{array}{l} \text{masa} = 3.9 \times 10^{-25} \text{ kg} \\ \text{diámetro} = 6 \times 10^{-10} \text{ m} \end{array} \right.$

La masa de cualquier átomo en kilogramos se puede obtener multiplicando el peso atómico de ese elemento por la masa atómica unidad, $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$. (Nota: Para el sistema de potencias de 10, usado aquí, véase el Apéndice VII.)

Por ahora no entraremos a considerar la estructura complicada de cada átomo, sino que consideraremos cada átomo como si fuera una pequeña partícula esférica de masa muy pequeña, aunque su estructura

desempeña un papel muy importante en su comportamiento físico y químico. En capítulos posteriores, donde es más conveniente hacerlo, consideraremos la estructura de los diferentes átomos en detalle.

10.2 Moléculas. Una de las propiedades más importantes de los átomos es su capacidad de actuar unos sobre otros a ciertas distancias. Algunos átomos ejercen entre sí una fuerza de atracción cuando se acercan, mientras que hay otros que ejercen una fuerza de repulsión. Cuando se produce atracción al acercarse dos o más átomos, éstos pueden combinarse para formar una molécula. Una vez que se ha formado la molécula, ésta se moverá y se comportará como si fuera una partícula unida, bajo diversas condiciones físicas.

En general, las moléculas pueden contener casi cualquier número de átomos. Aquellas que tienen un sólo átomo se llaman moléculas monoatómicas; las que tienen dos, diatómicas, y aquellas con tres, triatómicas. En el estado libre de un gas, algunos átomos, tales como los de helio, neón,

kriptón, prefieren existir solos, mientras que otros, como el hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, prefieren combinarse y moverse en parejas.

Como ejemplo de moléculas monoatómicas, tenemos al helio (He), neón (Ne) y kriptón (Kr); de moléculas diatómicas, tenemos al hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO); y de moléculas triatómicas, tenemos al ozono (O_3), dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y ácido cianhídrico (HCN) (véase la fig. 9A). Además de estos agregados atómicos sencillos, hay moléculas que contienen muchos átomos. Desde las moléculas diatómicas en adelante, se llaman moléculas poliatómicas.

En la fig. 10A se ve claramente que los átomos de una molécula pueden ser todos iguales o bien ser diferentes. El caso de que algunos átomos se unan entre sí en pares y otros no lo hagan, está relacionado con la estructura interna de los mismos átomos. Si los diferentes átomos de una molécula se acercan más entre sí que su separación normal, entonces se rechazan unos a otros y se separan. Si son obligados a alejarse, las fuerzas pasan a ser de atracción, y tienden a reunirlos nuevamente. En otras palabras, actúan como si estuvieran unidos mediante resortes, como se ilustra en la fig. 10B. Cuando se les hace estar más cer-

de una molécula, quedarán completamente independientes, como átomos libres. En la fig. 10C se da una gráfica de las fuerzas entre los átomos.

La escala horizontal de la distancia r entre los átomos será ligeramente distinta para

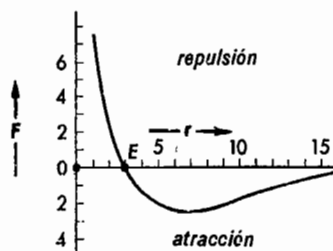


Fig. 10C. Gráfica típica de fuerzas entre los dos átomos de una molécula diatómica.

átomos diferentes, pero la posición de equilibrio E es aproximadamente 3×10^{-10} metros.

10.3 Peso molecular. El peso molecular de una sustancia se define como la suma de los pesos atómicos de los átomos que forman una molécula de esa sustancia. Por ejemplo, una molécula de dióxido de carbono, tiene dos átomos de oxígeno de peso 16 y un átomo de carbono de peso 12. El peso molecular del dióxido de carbono es, por ello, $16 + 16 + 12 = 44$. De modo semejante, el peso molecular del nitrógeno es de 28, el del oxígeno, 32, y el del helio 4. Para encontrar la masa en gramos de una molécula, se debe multiplicar su peso molecular por la unidad atómica de masa $1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

10.4 Los tres estados de la materia. Como ya dijimos, la materia puede existir en tres estados: 1) sólido, 2) líquido y 3) gaseoso. Si un sólido se calienta suficientemente, puede hacerse que se derrita y se licúe, y si se continúa calentando, hacerlo hervir o evaporar. Al convertirse en vapor, queda en el estado gaseoso. Por otra parte, si un gas se enfría lo necesario, podrá condensarse y convertirse en líquido. El continuo

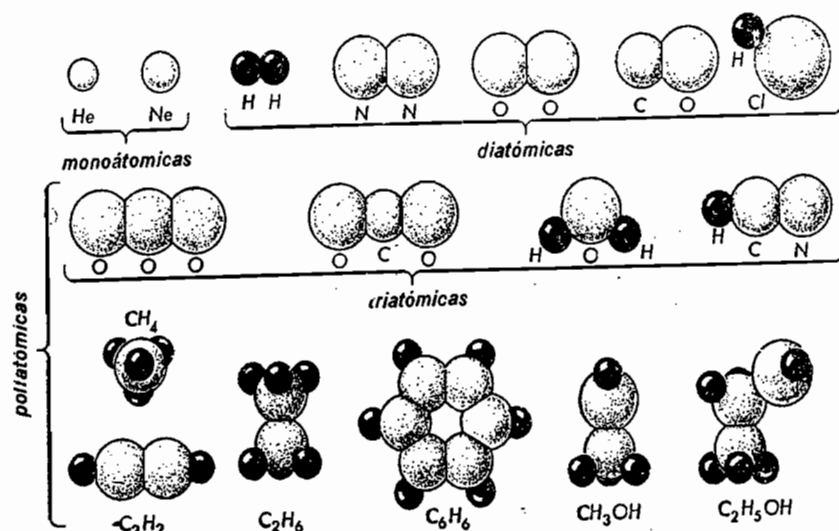


Fig. 10A. Diagramas esquemáticos de algunas moléculas comunes. Primera línea: Helio, neón, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, monóxido de carbono, ácido clorhídrico. Segunda línea: Ozono, dióxido de carbono, agua, ácido cianhídrico. Tercera línea: Metano, acetileno, etano, benceno, alcohol metílico y alcohol etílico.

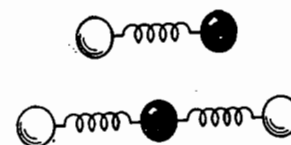


Fig. 10B. Las fuerzas entre las moléculas actúan como resortes.

ca, o más lejos, tienden a moverse de nuevo a cierta distancia de equilibrio. Se dice que buscan una posición de mínima energía potencial. Para hacer que estén más cerca o más separados, se necesita efectuar un trabajo.

Las fuerzas atómicas se debilitan mucho al aumentar la distancia, de manera que si se separan por algún medio los átomos

enfriamiento de un líquido hará que se solidifique o congele. En el caso del agua, la Naturaleza efectúa estos cambios de estado: el hielo se derrite para convertirse en agua, y el agua se evapora para convertirse en vapor; el vapor de agua se condensa en gotas que forman las nubes y caen como lluvia, y la lluvia se congela para convertirse en hielo o granizo. Todas las sustancias se pueden transformar de un estado a otro, aunque a veces es necesario un calentamiento o un enfriamiento extremo.

10.5 El estado gaseoso. Cuando una sustancia está en el estado gaseoso, se encuentra en una condición de extremado enrarecimiento. La mayoría de los átomos se encuentran agrupados en moléculas, que normalmente se encuentran muy alejadas unas de otras. Estas moléculas no están en reposo sino que se mueven a velocidades extremadamente elevadas, chocando unas con otras y con las paredes del recipiente. Estos golpes de los muchos millones de moléculas que pegan contra las paredes del recipiente, son los que producen lo que llamamos la presión de los gases.

Cuando se bombea aire para llenar una cámara de automóvil o un balón de goma, se está observando un buen ejemplo de la presión del gas. Como por dentro hay muchas moléculas de aire bombardeando las paredes de goma que por fuera, las paredes se mantienen firmes por dicho mayor bombardeo. Además de moverse linealmente, las moléculas gaseosas formadas por dos o más átomos, también vibran y giran en torno a su centro de masa. Todos estos movimientos aumentan de velocidad al elevarse la temperatura del gas, produciendo un aumento de presión. Cuando se disminuye la temperatura, se hacen más lentos los movimientos de los átomos, lo cual hace disminuir la presión.

El movimiento molecular puede ilustrarse por medio de un modelo mecánico, como se ilustra en la fig. 10D. Se colocan pequeñas esferas de acero entre dos placas paralelas de vidrio y se hacen mover por medio

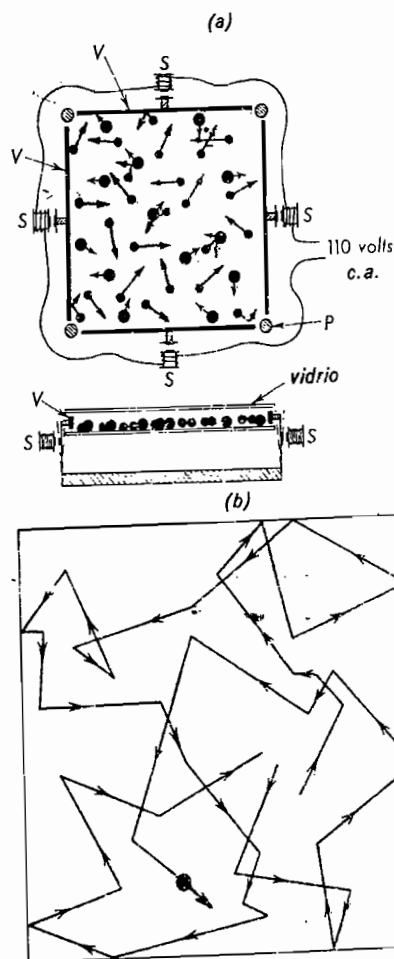


Fig. 10D. Modelo mecánico para explicar el movimiento al azar de las moléculas de un gas.

de tiras metálicas vibrantes a los lados. Cada tira se monta en el extremo de un pequeño muelle de acero y se le hace vibrar por medio de los pequeños electroimanes S. Cuando las esferas de acero chocan con estas cintas, rebotan a gran velocidad. En promedio, las esferas pequeñas se mueven considerablemente más aprisa que las grandes. Esto es característico para las moléculas de diferentes tamaños, que hay en las mezclas de dos gases diferentes, como el helio y el neón. Aumentando la vibración de las cintas de acero, se hace mover

más de prisa a las esferas. Esto es análogo al efecto del calentamiento de un gas a una temperatura más elevada.

10.6 El estado líquido. Cuando se enfría continuamente un gas, el movimiento molecular se hace cada vez más lento, hasta que, a cierta temperatura, el gas se con-

mientos irregulares, pero de apariencia viva, de pequeñas partículas suspendidas en un líquido. Estas partículas microscópicas parecían estar siendo agitadas continuamente, y dando una serie de saltos bruscos, primero en una dirección y luego en otra.

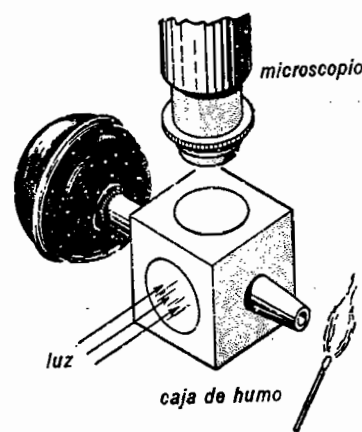


Fig. 10E. Montaje del experimento para observar el movimiento browniano de las partículas de humo.

densa en un volumen mucho menor y se convierte en líquido. Aunque las moléculas siguen moviéndose, no se mueven tan rápidamente como lo hacían en el estado gaseoso. Por otra parte, por estar mucho más cerca, se atraen con fuerzas suficientemente grandes para hacer que su movimiento ocurra en enjambres bastante compactos.

El vuelo libre de las abejas al volar en el aire, resulta comparable a las moléculas de un gas, mientras que su agrupación al posarse en la rama de un árbol corresponde con bastante aproximación a la condensación en el estado líquido.

10.7 Movimiento browniano. Aunque nadie ha visto nunca directamente el movimiento irregular de las moléculas, se pueden observar en un microscopio los movimientos resultantes de partículas mayores que sufren su continuo bombardeo. Este efecto fue descubierto en 1827 por Robert Brown, un botánico inglés que observó los movi-

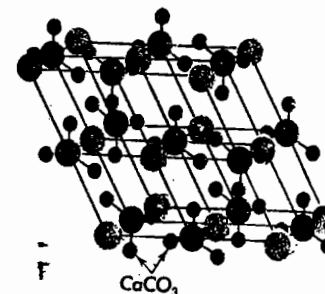
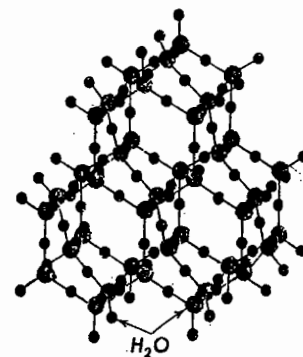
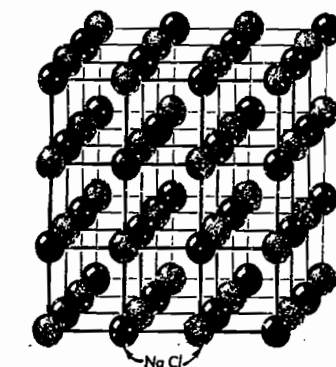


Fig. 10F. Modelos atómicos de cristales corrientes. (a) sal común, (b) hielo y (c) calcita.

Se ilustra en la fig. 10D (b) la trayectoria de una sola partícula. Estos movimientos se han llamado movimientos brownianos, en memoria de su descubridor. El primero que explicó estos movimientos fue Sir William Ramsey, en 1879, y se pueden observar en líquidos y en gases. Las pequeñas e invisibles moléculas de aire o de agua, se mueven a velocidades relativamente elevadas y bombardean vigorosamente a las partículas más grandes que sí pueden verse. Este bombardeo lo efectúan desde todas partes, y lanzan a estas partículas de un lado a otro. Las partículas más grandes tendrán movimientos brownianos más lentos.

En la fig. 10E se ilustra una forma de observar el movimiento browniano en un gas. Mediante una pera de hule, se succiona el humo de una cerilla recién apagada hacia el interior de una pequeña caja. El haz de luz intensa de una lámpara de arco que entra por un lado de la caja, a través de una ventana de vidrio, ilumina las partículas de humo, permitiéndonos verlas desde arriba con el microscopio de gran potencia que está encima de la caja. Las pequeñas partículas de humo parecen brillantes estrellitas disparadas de un lado a otro.

Para observar el movimiento browniano en un líquido, se pone primero una pequeña cantidad de gutagamba pulverizada (una goma natural de color amarillo-ana-

ranjado), en un poco de agua destilada, y se pone una gota de esta solución en el portaobjetos de un microscopio. Iluminadas lateralmente con una luz fuerte, las partículas microscópicas de gutagamba se verán bailando dentro del agua al ser golpeadas por las moléculas de ésta. Si recordamos que las partículas de gutagamba son miles de veces más pesadas que las moléculas de agua, nos daremos cuenta de que éstas deben moverse con velocidades muy grandes para producir los movimientos visibles de retroceso.

10.8 El estado sólido. Conforme se baja la temperatura de un líquido, disminuye su actividad molecular. Esto permite que las moléculas se acomoden más cerca entre sí y explica la ligera contracción del líquido al enfriarse y la correspondiente dilatación al calentarse. Las moléculas disminuyen su tendencia a viajar de un lugar para otro, conforme se van acercando más entre sí. Si se baja todavía más la temperatura, se llega finalmente a un punto donde el líquido se congela y se convierte en sólido.

En el estado sólido, cada molécula se encuentra confinada a un pequeño espacio definido entre las moléculas vecinas. Esto se ilustra en la fig. 10F con modelos atómicos de cristales ultramicroscópicos. El modelo de la izquierda ilustra una estructura cúbica, vértices muy simples en que los

átomos toman las posiciones de los vértices de una serie de cubos. La sal común, con sus dos clases de átomos, sodio y cloro, forma siempre esta estructura cúbica, alternando en las tres direcciones los diferentes átomos de una y otra clase, en el orden Na, Cl, Na, Cl, Na, etc.

El segundo cristal es del tipo de capas hexagonales en que la estructura principal presenta agujeros hexagonales, paralelos a través del cristal. El agua, al congelarse en forma de hielo o copos de nieve, se cristaliza

natural y presentan también estructura hexagonal (véase la fig. 10H).

El tercer modelo de la fig. 10F presenta la estructura atómica de un cristal de calcita. La calcita, que químicamente es un carbonato de calcio (CaCO_3), es un cristal transparente que se encuentra en la naturaleza. Nótese cómo los átomos de carbono y calcio forman los vértices de los paralelogramos, estando rodeado cada átomo de carbono por tres átomos de oxígeno.

Aunque algunos elementos y compuestos adoptan siempre la misma estructura cristalina al solidificarse, se sabe que algunos pueden tomar distintas formas de cristalización. Algunas de estas formas se encuentran en la naturaleza y otras se pueden producir en el laboratorio. El diamante, que es una de las formas cristalinas que toma el carbono, es un cristal estrechamente compacto que, hasta la fecha, ha desafiado todos los intentos de reproducción en el laboratorio. Aunque algunos tipos de cristales presentan estructuras más abiertas que otros, en los modelos se ha reducido el tamaño a escala de los átomos, con el fin de permitir que se vean los átomos que están colocados detrás de ellos en la estructura.

Los metales, en general, al enfriarse después de haberlos fundido, se solidifican en cristales ultramicroscópicos, que se agrupan de modo compacto para formar un mosaico tridimensional. En la fig. 10I se presentan

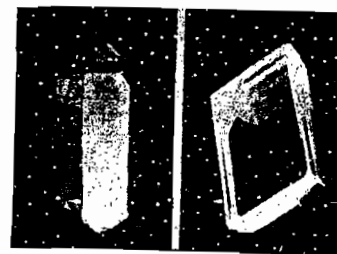


Fig. 10H. Cristales naturales de cuarzo y calcita.

en esta forma (véase la fig. 10G). Nótese que, dentro de la estructura atómica, cada átomo de oxígeno está unida a cuatro átomos de hidrógeno, mientras que cada hidrógeno está ligado a dos oxígenos. Los átomos de oxígeno y silicio que forman el cuarzo, de fórmula química SiO_2 , toman una estructura bastante similar en su estado

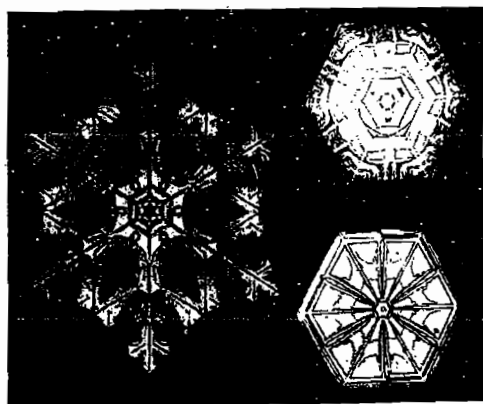


Fig. 10G. Fotografía de cristales de nieve mostrando su estructura hexagonal

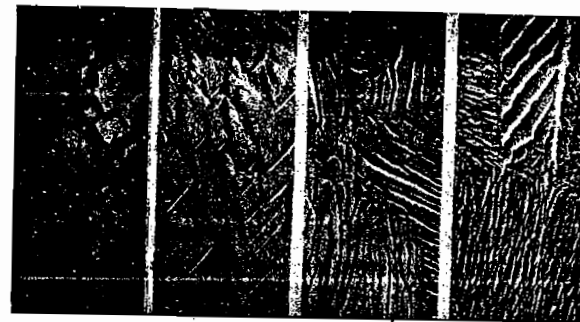


Fig. 10I. Fotografías tomadas con microscopio electrónico, mostrando la estructura cristalina de los metales, (a) aluminio puro 5 600x, (b), aleación de magnesio y aluminio 13 000x, (c), acero pulido 14 000x, y (d), cobre pulido 14 000x.

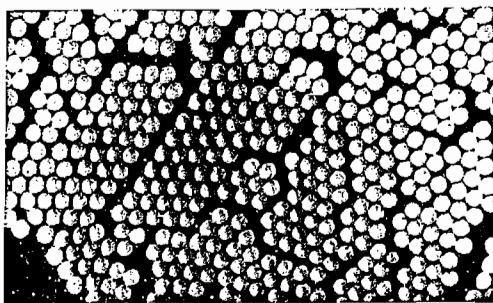


Fig. 10J. Fotografía tomada con microscopio electrónico de moléculas de poliestireno, mostrando su disposición hexagonal. Diámetro 5×10^{-7} cm.

buenas ilustraciones de esto, con fotografías tomadas con el microscopio electrónico. Nótese la estructura cúbica del aluminio puro que se ve muy claramente.

En realidad, los átomos de la mayoría de los líquidos empiezan a formar agregados cristalinos localizados, antes de llegar a la solidificación; pero, debido al estado de rápida vibración atómica, cada zona cristalizada puede moverse con respecto a las demás. Por esto se puede considerar al estado líquido como un estado de transición entre el gas, donde las moléculas existen individualmente, y el estado sólido donde los átomos vienen a formar parte de una estructura cristalina en la que ya no se puede considerar a cada átomo como parte de una molécula particular. En todos los sólidos, ya sean cristalinos o amorfos, la distancia media entre los átomos es del orden de 2×10^{-8} cm.

En la fig. 10J se ve una fotografía en la que se muestra cómo las esferas uniformes tienden a agruparse en forma hexagonal.

Aunque los átomos y moléculas se encuentran limitados a un espacio definido en la estructura de los sólidos, todavía hay movimiento dentro de dichos espacios limitados. El movimiento se hace más y más lento conforme disminuye la temperatura, hasta que, en el cero absoluto, -273°C , cesan todos los movimientos moleculares. Se entiende como movimiento molecular el movimiento de una molécula entera. A la temperatura del cero absoluto, en ciertos sólidos, todavía hay alguna vibración de los átomos. Se sabe que esta energía residual de vibración es una propiedad inherente de algunos sólidos y no se le puede quitar ni puede ser utilizada.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes problemas: *a)* número atómico; *b)* peso atómico; *c)* peso molecular; *d)* molécula monoatómica, y *e)* molécula diatómica.

2. ¿Qué es el movimiento browniano? ¿Cómo puede observarse?

3. Hacer un diagrama y explicar los movimientos atómicos y moleculares dentro de

un sólido. ¿Cómo cambian estos movimientos con una elevación de temperatura?

4. Explique brevemente los movimientos atómicos y moleculares dentro de un líquido. ¿Qué efectos tiene la temperatura sobre estos movimientos?

5. ¿Cuáles son los tres estados de la materia? ¿Cómo difieren entre sí estos tres estados? En general, ¿cuál es el más compacto?

6. ¿Cuántos elementos conocidos existen? ¿Qué constituye un elemento?

7. Dar un ejemplo de: *a)* una molécula monoatómica; *b)* una molécula diatómica; *c)* una molécula triatómica, y *d)* una molécula poliatómica.

8. ¿Qué tratamiento general de la mayoría de los líquidos cambiará su estado a líquido o gas?

9. ¿Qué puede Ud. decir acerca del acomodo de los átomos en un sólido, como el hierro? ¿En un sólido, como la sal de mesa?

PROPIEDADES DE LOS SÓLIDOS

Este capítulo se limitará a la exposición de algunas de las principales propiedades físicas de los sólidos, y los capítulos siguientes se ocuparán en forma análoga de los líquidos y los gases. Una de las propiedades más importantes de los sólidos es la que se conoce como *elasticidad*. Hay varios aspectos diferentes de elasticidad, como son, *estiramiento*, *flexión*, *compresión* y *torsión*.

11.1 Estiramiento de un resorte. Si una varilla, alambre o resorte colocado verticalmente, es sostenido rígidamente de su parte superior y se van agregando pesos colgados de su extremo inferior, se estira y su alargamiento está en proporción con el peso que se le suspende. Esta relación es una sencilla ilustración del comportamiento de los cuerpos sólidos, estudiada primero por Hooke y es la base de la ley que lleva su nombre. La ley de Hooke establece que, dentro de ciertos límites, *la deformación de un cuerpo sólido es proporcional a las fuerzas que se le aplican*.

En la fig. 11A se ve el estiramiento del resorte. Debido al peso W que se agregó,

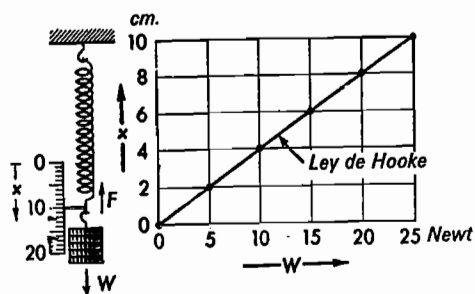


Fig. 11A. Estiramiento de un resorte para ilustrar la ley de Hooke.

el resorte se estira una distancia x . Si se agrega un segundo peso igual al anterior, la distancia total que se alarga será doble que la señalada. Si se agrega un tercer peso igual, la longitud total del estiramiento será tres veces mayor que la primera vez, etc. Esto se representa en forma gráfica a la derecha de la fig. 11A. Cada valor de x está representado verticalmente, y los valores correspondientes de la carga W se toman horizontalmente.

Para ser más exactos, cuando se agrega el primer peso de 5 newtons, el estiramiento o elongación es de 2 cm. Con dos pesas de 5 newtons, el alargamiento total es de 4 cm y con tres pesas de 5 newtons, $x = 6$ cm, etc. Si se continúa haciendo esto, se ve, como lo ilustra la parte derecha de la fig. 10A, que cada peso de 5 newtons produce una elongación adicional de 2 cm. Para ponerlo en forma de ecuación, lo escribimos así:

$$W = kx \quad (11a)$$

en donde k es una constante, que para este experimento vale 2.5 newtons/cm. Para cada valor de x se puede obtener el valor correspondiente de W multiplicado por 2.5. Cuando el resorte de la fig. 11A se estira una distancia x , el resorte en sí ejerce una fuerza hacia arriba, F , igual y en dirección opuesta a W . Entonces, para el resorte,

$$F = -kx \quad (11b)$$

El signo negativo indica que x y F tienen direcciones opuestas.

Esta ecuación se menciona con frecuencia como la ley de Hooke.*

En este experimento, la constante de proporcionalidad k mide la rigidez del resorte. Su valor de 2.5 newtons/cm significa que se necesita una fuerza de 2.5 newtons para estirar 1 centímetro la longitud del resorte. Cuanto mayor es la fuer-

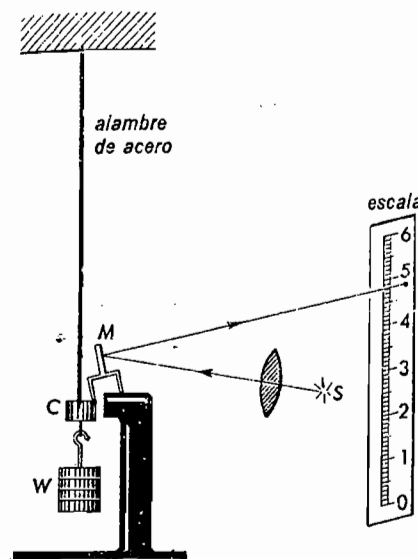


Fig. 11B. El estiramiento de un alambre bajo tensión creciente, puede medirse con un nivel óptico.

za necesaria para estirar el resorte una distancia unidad, tanto más rígido se dice que es el resorte.

11.2 El estiramiento de un alambre. Para poder comprobar la ley de Hooke, debe recurrirse a un método para medir los cambios muy pequeños de longitud, ya que un alambre o una varilla no se alar-

* Robert Hooke (1635-1703), físico experimental inglés, es conocido principalmente por su contribución a la teoría ondulatoria de la luz, la gravitación universal y la presión atmosférica. Dio origen a muchas ideas físicas, pero sólo desarrolló algunas de ellas. Si se hubiera limitado a estudiar menor número de temas, seguramente hubiera logrado mayores éxitos, y hubiera recibido mayor gloria. Tenía un genio irritable y lanzó muchos ataques virulentos a Newton y a otros científicos, reclamando que los trabajos que ellos publicaban se debían a él.

gan mucho, antes de llegar a su punto de ruptura. Esto se hace frecuentemente por medio de un aparato conocido como nivel óptico. Como se ilustra en la fig. 10B, un haz de luz es reflejado por un pequeño espejo, M , montado sobre una base de tres patas, dos de las cuales se apoyan en una plataforma estacionaria y la tercera en una pequeña grapa C , en el extremo inferior del alambre. Conforme el alambre se estira por la acción de los pesos W que se agregan, el espejo se inclina y el haz de luz se refleja más alto sobre la escala donde se pueden tomar lecturas.

El estiramiento del alambre obedece la ley de Hooke, al igual que el estiramiento del resorte descrito en la sección anterior.

El estiramiento es directamente proporcional a la fuerza aplicada, y se representa con el tramo recto de la gráfica AB de la fig. 11C. Si se quitan los pesos que se

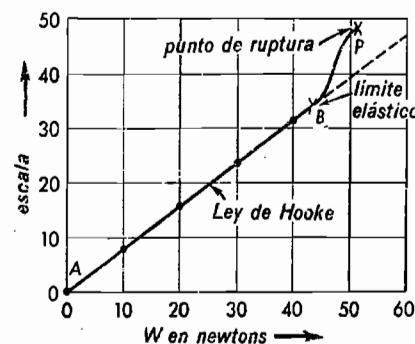


Fig. 11C. Gráfica del estiramiento de un alambre, indicando la ley de Hooke, el límite de elasticidad y el punto de ruptura.

habían suspendido, el alambre volverá a tener su longitud original. Si se van agregando sucesivamente más pesos, las fuerzas a que está sometido el alambre terminarán por ser demasiado grandes y ya no se cumple la ley de Hooke, puesto que la elongación aumenta más rápidamente. Esta es la parte BP de la gráfica. Si vamos más allá, llegará a romperse el alambre. El punto B , en que deja de cumplirse la ley de Hooke, es llamado el *límite de elasticidad*. Si se estira el alambre más allá de

este punto, quedará alargado permanentemente y no volverá a tener su longitud original, aun cuando se le quiten los pesos.

11.3 Esfuerzo unitario y deformación unitaria. Cuando se aplica una fuerza de cualquier magnitud a un cuerpo sólido, el cuerpo sólido se deforma. Ya sea grande o pequeña la deformación de una parte del cuerpo, se mueve con respecto a las partes inmediatas. Como consecuencia de este desplazamiento, las fuerzas atómicas de atracción, producirán fuerzas restauradoras que se oponen a la deformación y tienden a hacer volver al cuerpo a su forma y medidas originales. Cuanto mayor sea la fuerza aplicada, mayor será la deformación necesaria para crear esas fuerzas restauradoras que lleven al equilibrio.

En ingeniería, se tiene la costumbre de describir las fuerzas restauradoras de un cuerpo elástico deformado como los esfuerzos unitarios dando a este término la definición cuantitativa de *fuerza por unidad de área*. La deformación sufrida por el cuerpo a causa de las fuerzas aplicadas, produce un cambio geométrico llamado *deformación unitaria*. La deformación unitaria se define como una *medida cuantitativa de la magnitud de la deformación*.

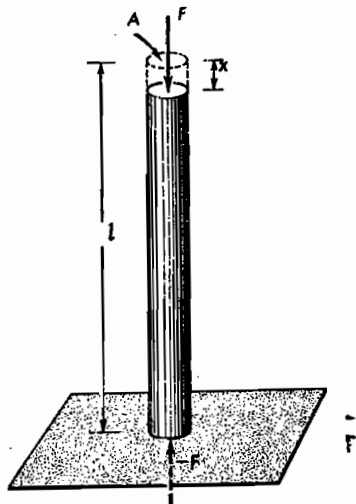


Fig. 11D. El módulo de Young para la compresión de una barra se obtiene con $F/A\Delta l$.

11.4 Compresión. Cuando se aplica una carga F al extremo de una barra, para comprimirla, como se indica en la fig. 11D, la disminución de longitud, Δl , tiene el mismo valor que la elongación que hubiera sufrido si se aplicara esa misma carga como una tensión. En otras palabras, la ley de Hooke también se cumple en la compresión.

11.5 Flexión. Cuando una varilla o viga se somete a una fuerza que tiende a doblarla, la cantidad de desplazamiento transversal que sufre, es proporcional a la fuerza aplicada. Esto se ilustra en la figura 11E, donde el diagrama (a) muestra

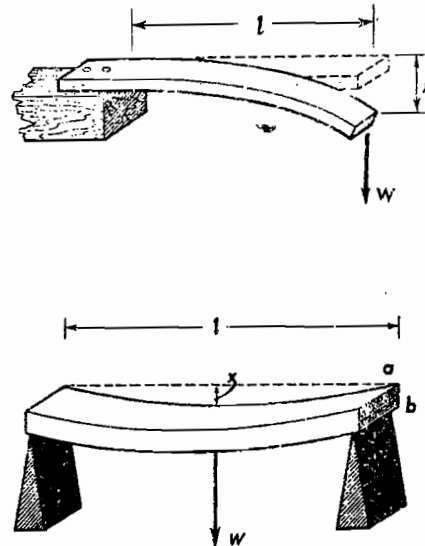


Fig. 11E(a). La flexión de un trampolín obedece la ley de Hooke. (b) La flexión de una viga obedece la ley de Hooke.

una varilla fijada por un extremo y con un esfuerzo aplicado en el otro. El diagrama (b) es una ilustración de una varilla semejante, sostenida sobre dos apoyos, P , en ambos extremos y con una carga aplicada sobre el centro. La magnitud de la flexión medida en cada caso por la distancia x , es proporcional a W . Haciendo una gráfica de W con relación a x , se obtiene una línea recta, igual que en el caso del estiramiento mostrado en la fi-

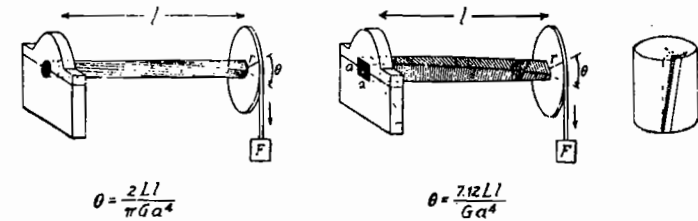


Fig. 11F. La torsión de una varilla obedece a la ley de Hooke.

gura 11A. Esta gráfica demuestra que la ley de Hooke es aplicable a la flexión de una varilla o viga, y que el fenómeno puede representarse por una fórmula igual a la ecuación (11a).

11.6 Torsión. Es de mucha aplicación en el diseño de máquinas, el conocimiento detallado de los esfuerzos y deformaciones torsionales. Cuando se fija por un extremo una varilla o una barra y se aplica un momento de torsión (par motor) por el otro extremo, se tuerce como lo ilustra la fig. 11F. Dentro de sus límites de elasticidad, el desplazamiento angular θ es proporcional al momento de torsión aplicado, T , donde $L = F \times r$.

Si, por ejemplo, un cierto momento de torsión tuerce el extremo de la varilla en un ángulo de 5° , un momento doble torcerá el extremo de la varilla un ángulo 2 veces mayor, o sea 10° , y un momento triple que el original torcerá la varilla también un ángulo triple, o sea 15° .

La fig. 11G ilustra una aplicación de los esfuerzos torsionales en la ortodoncia. La ortodoncia o la ortopedia dental, es la

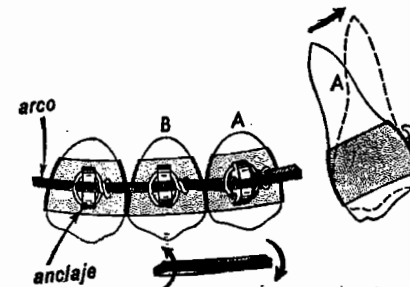


Fig. 11G. Aplicación del esfuerzo de torsión para enderezar los dientes en Ortodoncia.

rama de la odontología que principalmente se ocupa de enderezar los dientes que van creciendo torcidos. Hay una técnica de ortodoncia en que se acostumbra poner sobre cada diente una banda metálica que tiene una abrazadera. Cada abrazadera tiene una ranura rectangular, en la cual se sujeta un arco de alambre de sección cuadrada.

Para hacer que el diente A sufra una rotación, como se indica a la derecha, se produce una torcedura permanente en el alambre cuadrado del arco entre ese diente y el inmediato. Por este medio se produce un esfuerzo torsional sobre la inserción del alambre, y durante varias semanas ese esfuerzo va disminuyendo gradualmente, debido a la torsión del diente. Para los dentistas es perfectamente conocida la posibilidad del movimiento de las raíces de los dientes dentro de las mandíbulas.

11.7 Impacto de cuerpos elásticos. Cuando chocan dos cuerpos entre sí, la ley de conservación de la cantidad de movimiento establece que la cantidad de movimiento total, antes del impacto, es igual a la cantidad de movimiento total después del mismo; pero esta ley no es suficiente para determinar cuál será la velocidad de cada uno de los cuerpos. Véanse las secciones 7.3 y 7.4. Los distintos materiales se comportan en forma diferente al chocar y se separarán con velocidades distintas. Como ilustración, considérese el experimento de la fig. 11H.

Se dejan caer varias esferas de diferentes sustancias, sucesivamente y desde la misma altura, sobre la superficie tersa de un yunque y se deja que alcancen la má-

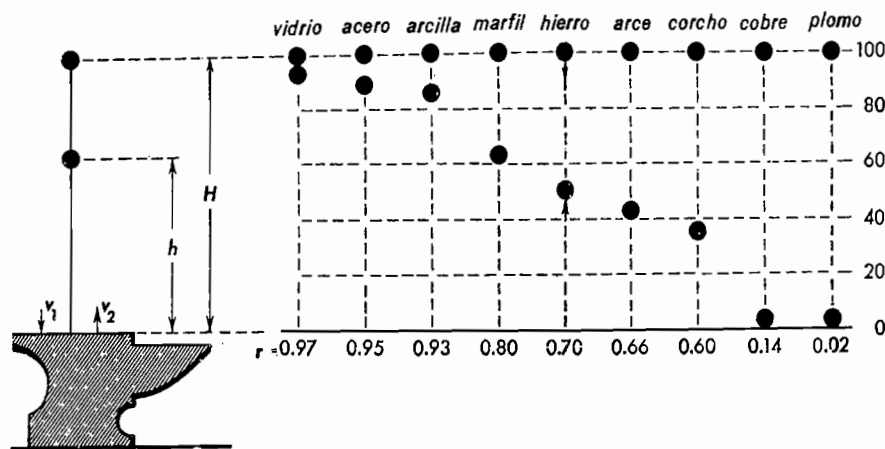


Fig. 11H. Experimento de rebote de esferas para ilustrar la resistencia al choque.

xima altura en el rebote. Al contrario de lo que sería de esperar, veremos que el vidrio y el acero rebotan a una mayor altura que una bola de caucho de la mejor calidad. Una esfera de plomo, por otra parte, apenas si rebota.

En este experimento particular, los cuerpos que chocan son las esferas y el yunque. Debido a su masa enorme, relativamente a las de las bolas, la velocidad de retroceso del yunque es insignificante.

Como ilustración de la compresión que sufre un sólido durante el choque con otro sólido, obsérvese la deformación de las dos pelotas ilustradas en la fig. 11I. Estas son fotografías instantáneas de (a),

una pelota de golf golpeada por el bastón, y (b), una pelota de tenis golpeada por la raqueta. Representan lo que se llama la *resistencia al choque* de la materia. La *resistencia al choque* se define como la *capacidad de un cuerpo para sufrir una compresión, o deformación rápida, sin que se produzca una deformación permanente*. La resistencia al choque es opuesta a la fragilidad.

11.8 Coeficiente de restitución. El *coeficiente de restitución* se define como el *número que expresa la relación que hay entre la velocidad con que dos cuerpos se separan después de un choque y la ve-*



Fig. 11I. Fotografías de (a), el impacto entre una pelota y un bastón de golf, y (b), el impacto entre una pelota y una raqueta de tenis.

locidad con que se aproximaron antes de la colisión.

$$r = \frac{\text{velocidad de separación}}{\text{velocidad de acercamiento}} \quad (11c)$$

o, como ecuación,

$$r = \frac{v_2}{v_1} \quad (11d)$$

Los valores de la constante r , para diferentes sustancias, pueden obtenerse del experimento descrito arriba determinando la velocidad v_1 de la esfera, justamente antes de llegar al yunque y la velocidad v_2 , precisamente al empezar el rebote. Es más conveniente usar las leyes de caída libre y calcular las velocidades a partir de las alturas a que llegan las esferas, que tratar de medir directamente las velocidades. Ya que $v = \sqrt{2gh}$ para los cuerpos que caen

(véase la ecuación 7c), $\sqrt{2gH}$ puede reemplazarse a v_1 y $\sqrt{2gh}$ a v_2 para darnos

$$r = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{2gH}}$$

$$r = \sqrt{\frac{h}{H}} \quad (11e)$$

Como se ilustra en la fig. 11H, H es la altura de la cual cae la esfera, y h es la altura hasta la que rebota. Para una sustancia muy elástica, como el vidrio o el acero, chocando con acero, r tiene un valor de 0.95 o más, mientras que para sustancias muy poco elásticas, tales como plomo, chocando con acero, r es extremadamente pequeña. Se ve en la ecuación (11e) que el valor mínimo de r es cero, mientras que el máximo es uno.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

- ¿Cómo se aplica la ley de Hooke a la flexión de un trampolín usado para lanzarse a una piscina?
- Dibujar una gráfica, representando la ley de Hooke tal como se aplica al estiramiento de un resorte helicoidal. Considerar que un esfuerzo de 100 g alarga el resorte en 3.5 cm y extienda el eje de esfuerzos en su gráfica hasta 1 kg.
- Establezca la ley de Hooke en la forma que se aplica a la torsión de una varilla larga de acero.
- Definir o explicar brevemente el coeficiente de restitución. ¿Cuáles son los valores menor y mayor posibles de esta constante? ¿Qué significan estos valores extremos al aplicarlos al impacto entre dos cuerpos?
- Un resorte de acero de 30 cm de largo, se estira hasta una longitud de 35.6 cm cuando se suspende de su extremo inferior una masa de 2 kg. Encontrar la longitud del resorte cuando se agregan 500 g más a su extremo inferior. (Resp. 37.0 cm.)
- Un alambre de bronce de 3 ft de largo se alarga 0.01 in cuando se cuelga una carga de 5 lb de su extremo inferior. ¿Qué fuerza se requiere para que se estire el alambre un total de 0.072 in?
- Una fuerza de 10 lb comprime un resorte 2.6 in. ¿Qué fuerza lo estirará 1.8 in? (Resp. 6.92 lb.)
- Un resorte de acero se alarga 3.2 cm cuando se somete a una tensión de 40 newtons. Calcular la fuerza necesaria para comprimir el mismo resorte 2.5 cm.
- El extremo libre de un trampolín en una piscina queda a 55 cm por encima del agua. Si un hombre de 50 kg, parado sobre el extremo del tablón, lo hace bajar hasta 35 cm del agua, ¿cuánta ha de ser la carga para que baje hasta 5 cm del agua? (Resp. 125 kg.)
- Se tira una bola de golf desde una altura de 1 m, llega a un piso de cemento y rebota a una altura de 55 cm. Calcular el coeficiente de restitución.

11. Una bola de acero, tirada sobre una plancha de acero desde una altura de 60 cm, rebota hasta una altura de 50 cm. Calcular el coeficiente de restitución. (Resp. 0.913.)

12. Una bola de marfil, cae sobre un yunque de acero y rebota hasta una altura de 30 cm. ¿Desde qué altura fue tirada si su coeficiente de restitución es 0.76?

13. Si se tira una canica de vidrio, desde una altura de 25 cm, sobre un trozo grueso y terso de vidrio, rebotará hasta una altura de 24 cm? ¿Cuál es el coeficiente de restitución? (Resp. 0.98.)

14. Se tira una bola de golf sobre un yunque de acero y rebota a una altura de 12.5 in. Si el coeficiente de restitución es de 0.81, ¿desde qué altura fue tirada?

15. Una bola de 2 kg, moviéndose con velocidad de 5 m/seg, choca de frente con una bola de 3 kg en reposo. Después del choque, la bola de 2 kg tiene una velocidad de 0.5 m/seg. a) Aplicando la ley de la conservación de la cantidad de movimiento, encontrar la velocidad de la bola de 3 kg después del choque. b) Calcular el coeficiente de restitución. (Resp. a) 3.0 m/seg; b) 0.50.)

16. Una masa de 15 kg, moviéndose con una velocidad de 12 m/seg, choca de frente con una masa de 6 kg en reposo. Después de la colisión, la masa de 6 kg retrocede con una velocidad de 16 m/seg. a) Encontrar la velocidad de retroceso de la bola más pesada. b) ¿Cuál es el coeficiente de restitución?

12

PROPIEDADES DE LOS LIQUIDOS

Las propiedades de los sólidos, tales como la flexión y la torsión, no existen en los líquidos. Pero los líquidos sí pueden someterse a compresión y, colocados en un recipiente completamente limpio, pueden someterse a muy grandes tensiones. Aunque estas propiedades son de interés considerable, hasta ahora no han tenido importancia práctica. Por otra parte, hay propiedades físicas de los líquidos que se consideran de gran importancia. Estas son: la presión, el empuje hacia arriba, la tensión superficial y la capilaridad.

12.1 Presión. Para el estudio que haremos en seguida de las propiedades de los líquidos, es necesario introducir el concepto de *presión* en contraste con lo que se entiende por *fuerza total*. La *presión* se define como la fuerza por unidad de área. Escrito en forma de ecuación,

$$\text{presión} = \frac{\text{fuerza total}}{\text{área}}$$

$$P = \frac{F}{A} \quad (12a)$$

Como ilustración de la diferencia entre presión y fuerza total, consideremos los dos trozos de metal de la fig. 12A. El trozo (a) se apoya sobre su base, con un área de 200 cm², mientras que el trozo (b) se apoya sobre un lado con área de 400 cm². Como los dos trozos pesan 5 000 newtons cada uno, ejercen separadamente la misma fuerza total hacia abajo. Apoyado sobre una base como en (a), la presión hacia

abajo está dada por la ecuación (12a), como

$$\text{presión} = \frac{5,000 \text{ newtons}}{200 \text{ cm}^2} = 25 \frac{\text{newtons}}{\text{cm}^2}$$

Esto se lee 25 newtons por centímetro cuadrado. Apoyado sobre un lado, como en (b), la presión es solamente la mitad.

$$\text{presión} = \frac{5,000 \text{ newtons}}{400 \text{ cm}^2} = 12.5 \frac{\text{newtons}}{\text{cm}^2}$$

En el primer caso, hay una fuerza hacia abajo, equivalente a 25 newtons sobre cada cm², mientras que en el segundo

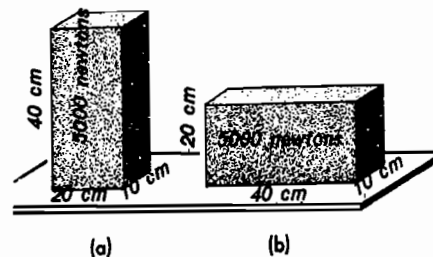


Fig. 12A. Un trozo de metal, levantado sobre un extremo, ejerce mayor presión que apoyado sobre un lado.

son 12.5 newtons. La presión en (a) es, por tanto, el doble de la presión en (b), siendo la fuerza total hacia abajo la misma.

Trasladando A al otro lado de la ecuación (12a), obtenemos:

$$F = P \times A \quad (12b)$$

La fuerza total es igual al producto de la presión por el área.

12.2 Presión de los líquidos. Con frecuencia, se necesita determinar la presión que hay a diferentes profundidades dentro de un líquido, y también la presión sobre el fondo o las paredes del recipiente que lo contiene. La regla referente a la presión establece que *el valor de la presión, a cualquier profundidad, es igual al peso que tiene una columna de líquido, de sección*

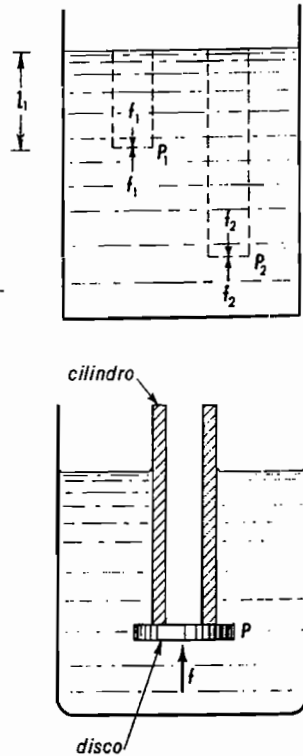


Fig. 12B. La presión en el seno de un líquido es igual al peso de la columna de líquido, de área transversal unidad, que queda sobre el punto considerado.

transversal unidad, que llegue desde ese punto hasta la superficie libre del líquido.

A la profundidad l_1 , como se indica en la fig. 12B, la presión p_1 está dada por el peso de una columna de líquido de 1 cm^2 de sección transversal y de $l_1 \text{ cm}$ de altura. A la profundidad mayor, l_2 , la presión p_2 está dada por el peso de una columna de

líquido de 1 cm^2 de sección transversal, y $l_2 \text{ cm}$ de altura.

Esto puede demostrarse con un cilindro de vidrio y un disco delgado y ligero, como se ilustra en la fig. 12B. El agua que rodea al cilindro vacío produce la fuerza f hacia arriba que sostiene al disco firmemente contra la boca del tubo. Si se llena gradualmente el tubo con agua, se ejerce una fuerza creciente, hacia abajo, sobre el disco. Justamente, cuando el agua del interior del tubo llega al nivel del agua de fuera, el disco cae del extremo del cilindro, demostrando que la fuerza hacia abajo y la fuerza hacia arriba se igualan en este punto y en este instante. Además de comprobar por este experimento que la presión en un punto dentro de un líquido está determinada por el peso del líquido que está encima del mismo, podemos también obtener la conclusión de que la presión en un punto es igual a la presión en cualquier otro punto que esté al mismo nivel dentro del líquido.

La presión ejercida por un líquido se define como la fuerza normal ejercida por el líquido en la unidad de área y se mide generalmente en dinas por centímetro cuadrado, newtons por metro cuadrado o libras por pulgada cuadrada. Debido a sus dimensiones, la presión no es vectorial.

12.3 La presión se ejerce en todas direcciones. En un líquido en reposo, la fuerza ejercida por el líquido sobre cualquier superficie, es perpendicular a dicha superficie. La fuerza ejercida en cualquier punto sobre un elemento de superficie es independiente de la orientación de esa superficie. Esto se puede ilustrar de muchas maneras. Por ejemplo, en la fig. 12C (a) se une una esfera hueca de acero B , por su parte superior, con un tubo metálico T . Empujando el pistón P mediante el mango H , se expulsa el agua por los tubos metálicos J , que salen de los lados y del fondo de la esfera. Los chorros de agua, subiendo hasta la misma altura al salir, hacen patente la igualdad de las fuerzas ejercidas en todas direcciones.

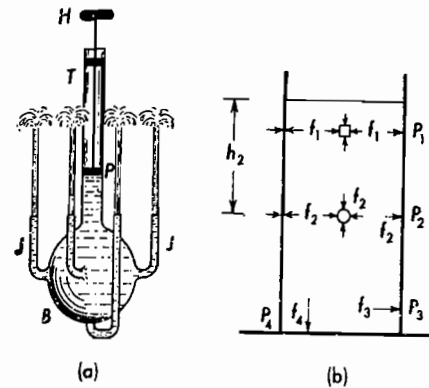


Fig. 12C. Experimentos para ilustrar la presión de los líquidos.

12.4 Masa específica y densidad. La masa específica de la materia, ya se trate del estado sólido, líquido o gaseoso, se define como la *masa de la unidad de volumen*. Algebraicamente,

$$\text{masa específica} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}}$$

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (12c)$$

Generalmente se usa la letra griega ρ (ro) para representar la masa específica. En el sistema CGS, la masa específica se da en *gramos por centímetro cúbico*. Ya que el gramo se define como la masa de un centímetro cúbico de agua, la masa específica del agua es 1 g/cm^3 . En el sistema MKS, la masa específica se expresa en *kilogramos por metro cúbico*.

Ejemplo 1. Si 25 cm^3 de mercurio tienen una masa de 340 g , ¿cuál es su masa específica?

Solución. Por sustitución directa en la Ec. (12c), obtenemos

$$\rho = \frac{340 \text{ g}}{25 \text{ cm}^3} = 13.6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Si se conocen el volumen y la masa específica de un cuerpo, se puede encontrar la masa con la ecuación (12c) así:

$$M = V \times \rho \quad (12d)$$

La densidad es otro concepto frecuentemente usado para expresar el peso relativo de la materia. La densidad se define como la *relación que hay entre el peso de un cierto volumen de una sustancia y el peso de un volumen igual de agua*.

Densidad

$$= \frac{\text{peso de una sustancia}}{\text{peso de igual vol. de agua}} \quad (12e)$$

Conforme a esta definición, la densidad de una sustancia está dada por el mismo valor numérico que su masa específica en el sistema CGS. Siendo una relación entre dos cantidades, la densidad no tiene dimensiones y, por lo tanto, es la misma en todos los sistemas de unidades. Por ejemplo,

TABLA 12A. MASAS Y PESOS ESPECÍFICOS DE ALGUNAS SUSTANCIAS COMUNES

Material	gm/cm ³	lb/ft ³
Líquidos		
Aceite de olivo	0.918	57.3
Agua (0°C)	1.000	62.4
Alcohol (20°C)	0.79	49.3
Bencina (0°C)	0.90	56.2
Gasolina (0°C)	0.69	41.2
Mercurio (20°C)	13.6	849.
Sangre (37°C)	1.04	65.0
Metales		
Aluminio	2.7	168.7
Bronce	8.5	530
Cobre	8.9	556
Estaño	7.3	456
Oro	19.3	1205
Zinc	7.1	446
Maderas		
Arce	0.62-0.75	39-47
Balsa	0.11-0.13	7-8
Cedro	0.49-0.57	30-35
Corcho	0.22-0.26	14-16
Roble	0.60-0.90	37-56
Miscelánea		
Cuaízo	2.65	165
Hielo	0.91	57.2
Vidrio	2.4-2.8	150-175

plo, la densidad del aluminio es 2.7, lo cual significa que cualquier pieza sólida de aluminio pesa 2.7 veces más que un volumen igual de agua.

Por comodidad solamente, algunos ingenieros y otras personas emplean frecuen-

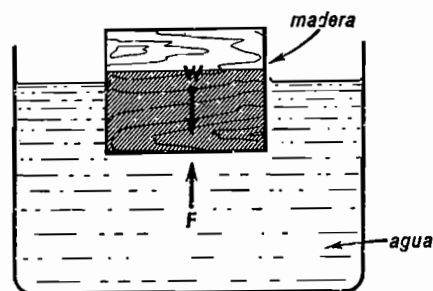


Fig. 12D. Un trozo de madera se sumerge en el agua hasta que el empuje del agua hacia arriba iguale a su peso.

temente la cantidad llamada *peso específico*, que es el *peso de la unidad de volumen* de la sustancia considerada. Debe

12.5 Principio de Arquímedes. El principio de Arquímedes establece que un cuerpo que flota o se sumerge en un líquido, es empujado hacia arriba con una fuerza igual al peso del líquido desalojado por el objeto. Por ejemplo, un trozo de madera, flotando en el agua, como indica la fig. 12D, es sostenido flotando por una fuerza F , que es igual al peso del agua desalojada (correspondiente a la parte sombreada). Cuando se coloca el trozo de madera en el agua, se sumerge hasta que la fuerza F hacia arriba sea suficientemente grande para igualar la fuerza hacia abajo, W , el peso de la madera.

En la fig. 12E se ilustra una demostración experimental del principio de Arquímedes. Un vaso cilíndrico pequeño, que contiene un cilindro metálico sólido, que cabe justamente en él, es equilibrado exactamente con pesas en una balanza de brazos iguales. La balanza no sufre ningún cambio cuando se saca el cilindro sólido del vaso y se suspende del gancho que

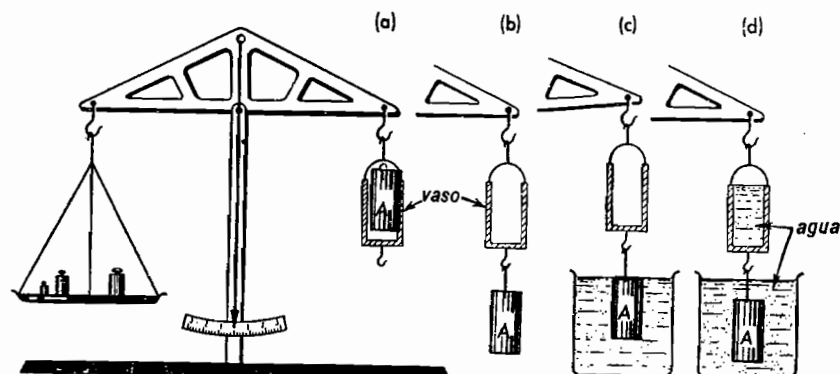


Fig. 12E. Los cuatro pasos del experimento que demuestra el principio de Arquímedes.

tenerse cuidado de no confundir el peso específico con la masa específica definida en la ecuación (12c).

$$\text{peso específico} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

$$\rho_w = \frac{W}{V} \quad (12f)$$

tiene por debajo, tal como se ilustra en (b). En (c) se ha colocado un vaso con agua, hasta que el cilindro queda sumergido completamente en ella. Ahora se ha destruido el equilibrio, porque hay un empuje hacia arriba por acción del agua sobre el cilindro.

Si el principio de Arquímedes es correcto, la fuerza hacia arriba es igual al

peso de un volumen de agua exactamente igual al volumen del cilindro. Si se agrega lentamente agua al recipiente, como se indica en (d), se restablece el equilibrio exactamente en el instante en que se llena el recipiente. El equilibrio restablecido confirma el principio de Arquímedes.

12.6 Medidas de la masa específica y de la densidad. El uso del principio de Arquímedes es una de las formas más conocidas para medir la masa específica de sólidos y líquidos. En la fig. 12F se indica

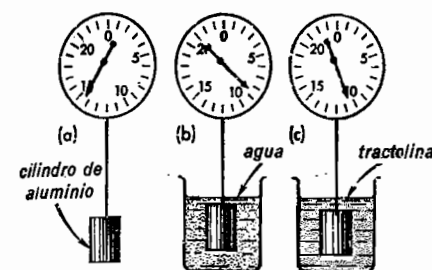


Fig. 12F. El empuje de flotación, puede usarse para determinar la masa específica de sólidos y líquidos.

un experimento, con el cual se puede determinar la masa específica de un sólido (aluminio) y de un líquido (aceite de parafina). Se pesa un cilindro sólido de aluminio en una balanza de resorte: (a) en el aire, (b) en el agua y (c) en el aceite de parafina (tractolina).

La prueba (a) nos da directamente la masa del cilindro, que es de 1 400 gramos. Cuando se sumerge en agua, la balanza indica una masa de 880 g únicamente. La diferencia $1\,400 - 880 = 520$ g multiplicada por g , es la fuerza hacia arriba y, por lo tanto, el peso del líquido desplazado por el cilindro. Como la masa específica del agua es igual a 1 g/cm^3 , 520 g de agua ocuparán un volumen de 520 cm^3 . Por lo tanto, 520 cm^3 es también el volumen del cilindro. Por la ecuación (12c), la masa específica del cilindro de aluminio es

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{1\,400 \text{ g}}{520 \text{ cm}^3} = 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Sumergiendo en aceite de parafina, el cilindro pesa 1 040 g, indicando una fuerza hacia arriba de $1\,400 - 1\,040 = 360$ g, multiplicados por g . Ya que el cilindro desplaza su volumen de 520 cm^3 de líquido tiene una masa de 360 g, la masa específica del aceite de parafina es

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{360 \text{ g}}{520 \text{ cm}^3} = 0.69 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

12.7 Adhesión y cohesión. Toda la materia está compuesta de átomos y moléculas. Como ya dijimos en el Capítulo 10, estas partículas ultramicroscópicas se atraen unas a otras con fuerzas que dependen de la clase de átomos o moléculas en cuestión, y de la distancia que las separe. Cuanto más cerca estén dos átomos o moléculas, mayor será la fuerza de atracción entre ellas. La fuerza de atracción entre diferentes clases de moléculas, es llamada *adhesión*, y la fuerza de atracción entre moléculas de la misma sustancia es llamada *cohesión*.

Aunque las fuerzas de atracción entre dos moléculas son extremadamente pequeñas, la atracción combinada de los miles de millones de moléculas contenidas en una pequeña partícula de materia, es sorprendentemente grande. Un cable de acero, de 2.5 cm de diámetro transversal, podrá soportar una carga de más de 25 toneladas sin romperse. Esta es una medida directa de las fuerzas de cohesión ejercidas entre los billones de átomos.

La diferencia entre la cohesión y la adhesión puede demostrarse por el experimento ilustrado en la fig. 12G. Se sos-

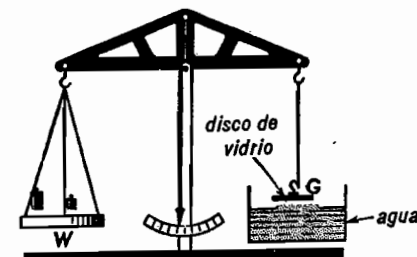


Fig. 12G. Experimento que ilustra las fuerzas de adhesión entre el vidrio y el agua.

tiene una placa de vidrio, G , suspendida del brazo de una balanza. La placa se pone en contacto con la superficie del agua, después de haberla equilibrado con pesas en el otro platillo de la balanza. Después se agregan pesas suplementarias en W , hasta que la placa se desprende de la superficie del agua. Si examinamos el vidrio, encontramos que hay agua adherida a su superficie, lo que nos hace ver que la separación ocurrió entre las moléculas de agua. Las fuerzas de adhesión entre las moléculas de vidrio y las de agua, exceden, por lo tanto, a las fuerzas de cohesión entre las moléculas de agua. El peso suplementario que se agregó a este experimento, medirá estas fuerzas de cohesión.

Si en este experimento se sustituye el agua por mercurio, al aplicar pesas para separar el vidrio de la superficie del mercurio, las pesas agregadas medirán la adhesión, la fuerza de atracción entre el vidrio y el mercurio. Esto se sabe por el hecho de que no queda mercurio adherido a la superficie de vidrio. La cohesión entre las moléculas de mercurio, en este caso, es mayor que la adhesión entre el mercurio y el vidrio.

12.8 Tensión superficial. En los líquidos, la cohesión de las moléculas da lugar a un fenómeno llamado tensión superficial. Desde el punto de vista de la atracción molecular, la superficie de los líquidos se comporta en todo momento como si existiera sobre ella una delgada membrana estirada, y como si esta membrana estuviera sometida a una tensión y tratara de contraerse. A esto se debe que las gotas de neblina o de lluvia, burbujas de jabón, etc., tengan forma esférica cuando caen por el aire. (La forma esférica es la que tiene mínima superficie para un determinado volumen de materia, en comparación con cualquier otra figura geométrica.)

La fig 12H (a) ilustra un experimento realizado para observar la forma esferoidal de las gotas líquidas. Se vierten cuidadosamente alcohol y agua en un vaso de

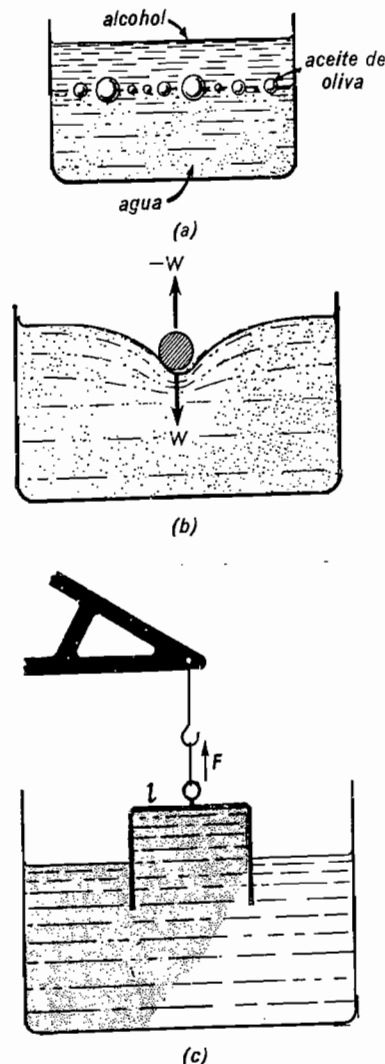


Fig. 12H. Experimentos para demostrar la tensión superficial: (a) Forma esferoidal de las gotas. (b) Aguja de acero flotando sobre el agua. (c) Medida de la tensión superficial.

vidrio, donde se forma una superficie de separación entre ellos, quedando el agua en el fondo, debido a su mayor masa específica. Si entonces se agrega aceite de oliva, que no es soluble ni en agua ni en alcohol, las gotas de aceite toman rápidamente la forma esférica y, debido a su masa específica intermedia, se asientan len-

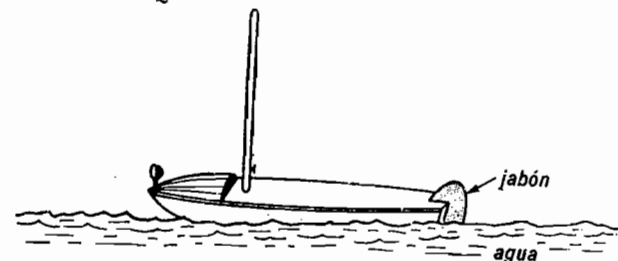


Fig. 12I. Botecito de madera impulsado por la tensión superficial y la adhesión.

tamente en la superficie de separación, donde quedan suspendidas.

Otra ilustración de la tensión superficial, es el experimento en que se hace flotar una aguja de acero. Se deja horizontalmente una aguja común sobre la superficie del agua en un vaso abierto, y se quedará a flote, como se ve en la figura 12H (b). (Si se pasa la aguja entre los dedos, antes de ponerla en el agua, se depositará en ella una delgada película de grasa, que hace más fácil la experiencia. La adhesión entre el agua y la grasa es muy pequeña.) Para que la aguja se abra camino a través de la superficie, necesita separar entre sí las moléculas de agua, pero en vez de ello, la superficie se deprime hasta producir una fuerza hacia arriba, $-W$, que, por el principio de Arquímedes, es igual al peso del líquido des-

plazado, y llega a igualar a la magnitud del peso de la aguja.

Se puede efectuar un experimento interesante adhiriendo un trozo de jabón a la popa de un pequeño bote de madera, y colocando después el bote en la superficie de un tanque de agua, como lo indica la fig. 12I. Conforme se va disolviendo el jabón, la tensión superficial del agua se debilita grandemente en la parte de atrás del bote, y la tensión superficial y la adhesión de la parte del frente, tiran del bote hacia adelante. Tan pronto como la película de jabón cubre toda el agua, dejará de moverse el bote.

Hay otro experimento semejante, que consiste en poner pedacitos de alcanfor en un vaso con agua. Cada hojuela de alcanfor es impulsada rápidamente sobre la superficie del agua, de modo semejante a

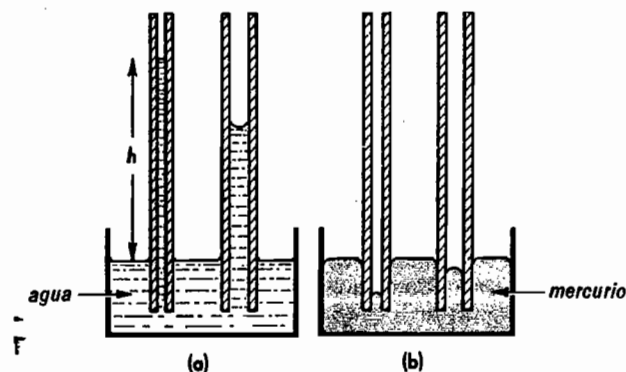


Fig. 12J. El ascenso del agua y descenso del mercurio en los tubos capilares, se debe a la adhesión, la cohesión y la tensión superficial.

como fue impulsado el bote. El alcanfor, que se disuelve más rápidamente en las partes agudas de la hojuela, reduce la tensión superficial en mayor proporción en esos puntos que en los demás.

En el laboratorio se mide generalmente la tensión superficial con un aparato semejante al ilustrado en la fig. 12H (c). Un pequeño marco de alambre de longitud l , es sumergido en agua, y luego se va tirando hacia arriba lentamente. Como consecuencia de la cohesión y la adhesión, se forma una película delgada de agua en el interior del marco. Esta película tira del marco hacia abajo, con una fuerza que se puede medir suspendiendo el marco de un brazo de una balanza. Se agregan lentamente las pesas necesarias al otro lado de la balanza, no dibujada en la figura (ver fig. 12E), hasta que se rompa la película del líquido. El peso máximo, agregado antes de que se rompa la película, mide directamente la tensión superficial debida a la cohesión de la película.

La tensión superficial se define como la fuerza de contracción a lo largo de una línea de longitud unidad, siendo perpen-

TABLA 12B. TENSION SUPERFICIAL DE ALGUNOS LÍQUIDOS

Líquidos	T en dinas/cm		
	0°C	20°C	50°C
Acetona	26.3	23.7	19.9
Agua	75.6	72.7	19.8
Alcohol	24.0	22.3	25.0
Bencina	31.5	28.9	445.0
Mercurio	508.0	480.0	67.9

diculares las direcciones de la fuerza y de la línea, y estando ambas en la superficie del líquido. Si F es la fuerza máxima aplicada en el experimento anterior y l es la longitud del marco de alambre, la tensión superficial T , se obtiene con

$$T = \frac{F}{2l} \quad (12g)$$

El factor 2 se agrega porque en cualquier película, por delgada que sea, hay dos superficies, haciendo que la longitud efectiva sea equivalente al doble de su longitud.

12.9 Capilaridad. Cuando se coloca un tubo largo en un vaso con agua, como se ilustra en la fig. 12J (a), el agua sube dentro del tubo hasta llegar a una cierta altura, y ahí se detiene. Cuanto más fino sea el calibre del tubo, más alto subirá el agua.

El agua sube en los tubos capilares, debido a que la fuerza de adhesión del vidrio con el agua es mayor que la fuerza de cohesión del agua. Cuando se sumerge el extremo de un tubo de calibre fino en el agua, las paredes del mismo que quedan un poco por encima de la superficie del líquido, atraen a las moléculas del agua, levantándolas por cohesión. Este proceso continúa, llenándose de líquido el espacio que queda abajo al subir el agua más y más arriba. La tensión superficial, que también es consecuencia de la cohesión, evita que el agua vuelva a descender. El agua sigue subiendo hasta que la tensión superficial es equilibrada por el peso del líquido que llena el tubo.

La altura a la que subirá el agua en un tubo capilar, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$h = \frac{2T}{r\rho g} \quad (12h)$$

Las unidades con que se mide la tensión superficial, T , en el sistema CGS, son dinas por centímetro de longitud; r , es el radio de la sección del tubo en centímetros; ρ , la masa específica del líquido en g/cm^3 , y g , la aceleración debida a la gravedad, que vale 980 cm/seg^2 .

Ejemplo 2. Se coloca un extremo de un tubo capilar en un vaso con agua. Tomando la tensión superficial como 70 dinas/cm y el diámetro del orificio del tubo como 1 mm , encontrar la altura a que sube el agua.

Solución. Por sustitución directa en la ecuación (12h), obtenemos

$$h = \frac{2 \times 70}{0.05 \times 1 \times 980} = 2.86 \text{ cm}$$

Metiendo un tubo de vidrio en mercurio, las potentes fuerzas de cohesión forman una superficie convexa, tal como se ve en la fig. 12J (b). Aquí la tensión superficial trata de aplanar esta superficie, haciendo que el líquido descienda a un

nivel más bajo. La ecuación (12h), para el ascenso de un líquido en un tubo capilar, puede aplicarse aquí para medir el descenso del mercurio o cualquier otro líquido que *no moje* al tubo.

La tensión superficial es la que regula parcialmente el ascenso de la savia dentro de los árboles. Se ha demostrado con experimentos efectuados cuidadosamente que por tensión superficial se puede subir el agua a alturas de más de 30 metros.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cómo define la presión? ¿Cuáles son las unidades de presión en el sistema mks? ¿En el sistema de ingeniería o inglés?

2. ¿Cómo puede calcularse la presión dentro de un líquido a cualquier profundidad? ¿Es una fuerza la presión? ¿Es vectorial la presión?

3. Si conoce la presión sobre una superficie plana dentro de un líquido, ¿cómo puede calcular la fuerza ejercida sobre un área dada en esa superficie?

4. Expresar el principio de Arquímedes. ¿Por qué flota un trozo de madera sobre el agua? ¿Por qué se sumerge un trozo sólido de metal?

5. ¿Cómo compara el peso de un trozo de metal en el aire con su peso aparente sumergido en agua?

6. ¿Cómo es que puede flotar en agua un barco enteramente hecho de acero, mientras que una esfera sólida se sumerge?

7. ¿Cuál es el peso aparente de un trozo de madera flotando en agua?

8. ¿Cuál es la diferencia entre adhesión y cohesión? ¿Cómo resultan al compararse las fuerzas de cohesión del mercurio con sus fuerzas de adhesión con el vidrio?

9. ¿Cómo resultan al compararse las fuerzas de cohesión de las moléculas de agua con sus fuerzas de adhesión con el vidrio?

10. ¿Qué es la tensión superficial? ¿Cuál es el estado esferoidal? ¿Por qué toman forma esférica las gotitas de un líquido?

11. ¿Cómo puede flotar una aguja o una hoja de rasurar de acero sobre el agua? ¿Qué sostiene estas piezas de acero arriba?

12. Definir la tensión superficial. ¿Cómo cambia la tensión superficial con la temperatura? ¿Cuál tiene mayor coeficiente, el mercurio o el agua? ¿Qué influencia tendría esta diferencia con la rigidez de las gotas de agua o mercurio de igual tamaño

13. ¿Qué es la capilaridad? ¿Por qué sube el agua dentro de un tubo de vidrio?

14. Cuando se coloca un tubo de vidrio dentro de mercurio, el líquido se deprime en vez de elevarse. ¿A qué cree que se deba esto?

15. En un extremo de una piscina, el agua tiene 12 ft de profundidad. Encontrar la presión sobre el fondo en lb/in^2 . (Resp. 5.20 lb/in^2 .)

16. Encontrar la presión a una profundidad de 100 ft por debajo de la superficie del agua en un lago.

17. Un anillo de oro tiene una masa de 33.0 g. ¿Cuál será su masa aparente cuando se determina bajo el agua? Para las masas específicas de las sustancias, ver la Tabla 12A. (Resp. 31.29 g .)

18. Un cubo sólido de cobre tiene 3 cm por lado. Calcular su masa aparente en: a) aire; b) agua; c) gasolina, y d) mercurio.

19. Se encuentra que el agua a 20°C sube a una altura de 6 cm en un tubo capilar de vidrio. ¿Cuál es el diámetro hueco del tubo? (Resp. 0.494 mm .)

20. Un tubo capilar tiene un diámetro interior de 0.10 mm. ¿A qué altura subirá el agua en este tubo si está a una temperatura de 50° C?

21. Un tubo capilar de vidrio con un orificio de 0.55 mm de diámetro, se coloca verticalmente dentro de un plato con mercurio. Encontrar la depresión de la columna de mercurio si la temperatura es de 20° C. (Resp. 2.62 cm.)

22. Los tubos de agua en cierta calle se mantienen a una presión de 45 lb/in². ¿Cuál es el nivel más alto a que el agua puede subir en un edificio de esa calle? Considere que los tubos están enterrados 5 ft debajo de la calle.

23. Un trozo de metal tiene una masa de 260.0 g en el aire, 224.4 g en el agua y 231.9 g en un líquido (aparentemente). Encontrar la masa específica de: a) el metal y b) del líquido; c) Identificar el metal y el líquido refiriéndose a la Tabla 12A. (Resp. a) 7.30 g/cm³; b) 0.79 g/cm³; c) estaño y alcohol.)

24. Una pieza de joyería tiene una masa de 348.0 g, en el aire; de 308.9 g, en el agua, y de 321.0 g, en un líquido desconocido. Encontrar la masa específica de: a) la joya, y b) el líquido desconocido. c) Identificar el metal y el líquido refiriéndose a la Tabla 12A.

13

PROPIEDADES DE LOS GASES

13.1 La atmósfera de la Tierra. Aunque no nos demos cuenta de ello, en la superficie de la Tierra estamos sumergidos en un gran océano de aire, llamado atmósfera. El aire, que en la Tierra es el gas más común, es, en realidad, una mezcla de varios gases bien conocidos: contiene un 77% de nitrógeno, 21% de oxígeno y 1% de argón. El 1% restante comprende pequeñas cantidades de gases, tales como bióxido de carbono, hidrógeno, neón, criptón, helio, ozono y xenón.

La atmósfera tiene su máxima densidad al nivel del mar (ver la fig. 13A), y se extiende hacia arriba hasta alturas que varían entre 80 y varios cientos de kilóme-

el espacio interestelar, que frecuentemente se menciona como el más perfecto de los vacíos, contiene una pequeña, pero definida, cantidad de materia en estado gaseoso: teniendo aproximadamente una molécula en cada centímetro cúbico.

La fig. 13B es una sección transversal esquemática de la atmósfera, hasta una altura de 40 kilómetros. Se aprecia, en el lado derecho del diagrama, que el 50% de la atmósfera queda debajo de los 5.5 kilómetros y que el 99% está comprendida en 32 km. Aunque la mayor parte de la atmósfera queda debajo de estos niveles, se sabe por experimentos con ondas de radio que todavía a varios cientos de kilómetros de altura hay suficiente aire para reflejar las ondas de radio y regresarlas a la Tierra.

Como la mayoría de los humanos vivimos cerca del nivel del mar, nos encontramos continuamente sometidos a una enorme presión, debida al peso del aire que está sobre nosotros. Aunque parece increíble, el aire ejerce una presión de casi 10 newtons sobre cada cm². La presión atmosférica es el peso de una columna de aire de 1 cm² de sección transversal y una altura que llega desde el nivel del mar hasta las últimas capas de la atmósfera.

Se define la presión de una atmósfera como la presión atmosférica media al nivel del mar. Su valor se ha encontrado que es igual a 1 013 000 dinas/cm² ó 14.7 lb/in².

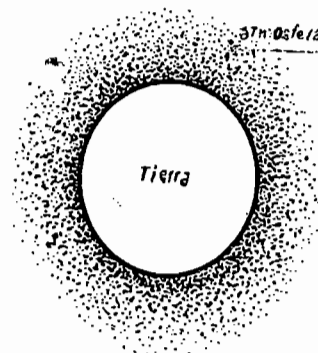


Fig. 13A. El aire envuelve a la Tierra. Se ha exagerado la altura para destacar la disminución de la densidad con la altitud. (Si se dibujara a escala, la atmósfera sería más delgada que la línea con que se representa la superficie de la Tierra.)

tros. La aparente inseguridad de la altura exacta de la atmósfera, no es real, porque el aire se va haciendo cada vez más tenue conforme más alto se sube, y finalmente se diluye en el espacio interestelar. Por observaciones, se ha probado que también

presión atmosférica normal

$$= 1\,013\,000 \text{ dinas/cm}^2$$

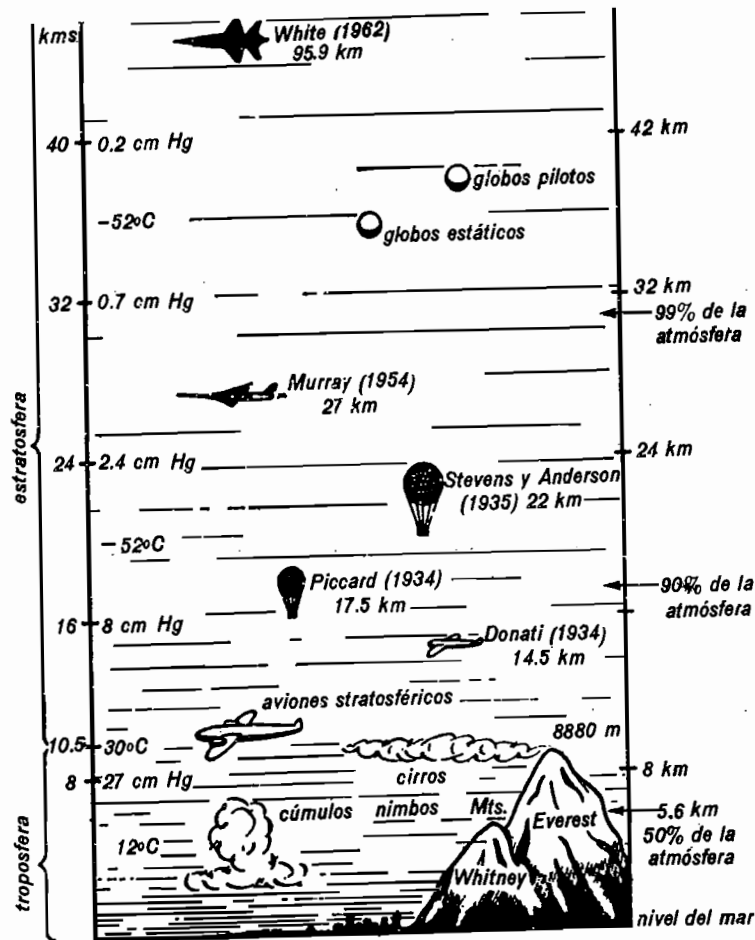


Fig. 13B. Datos importantes de la troposfera y la estratosfera y las alturas alcanzadas por el hombre en globos y aeroplanos.

13.2 La masa específica del aire. Se puede demostrar el peso del aire por medio de uno de los más simples experimentos que existen. Una esfera de bronce hueca, con volumen de 1 litro (1 litro = 1000 cm³), se pesa primero cuando está llena de aire y nuevamente cuando se le ha hecho el vacío (ver la fig. 13C). Se encuentra que, cuando se le hace el vacío, es 1.29 g más ligera que antes. Si se equilibra la balanza primero, cuando la esfera tiene hecho el vacío, y luego se permite entrar al aire, se deberá agregar una

masa de 1.29 g para volver a restablecer el equilibrio. Ya que ésta es la masa de 1000 cm³ de aire, la masa de 1 cm³ será de 0.00129 g. Ésta es la masa específica del aire.

Si se repite el experimento anterior a una altura de 8 km, el aire que llena el recipiente de bronce, pesará sólo una tercera parte de lo que pesaba al nivel del mar. La razón de esto es que la presión es menos a la altura de 8 km y sólo impulsa un tercio del aire para llenar el recipiente, al que se le había hecho el vacío.

Por otra parte, si se bombea aire en una esfera hueca, se puede hacer que aumente considerablemente su peso, dándole una masa específica mayor. La masa específica de un gas es, por tanto, normalizada y definida como la masa de 1 cm³ del gas medido a la presión y temperatura normales. La presión normal se define como la presión de una atmósfera y la temperatura normal es de 0° C. En la Tabla 13A

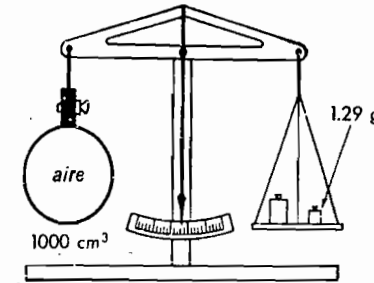


Fig. 13C. Pesando el aire.

se dan las masas específicas de algunos gases comunes.

Es preciso expresar la temperatura, puesto que los gases se dilatan con la elevación de su temperatura. La presión normal de una atmósfera está dada en la ecuación (13b).

13.3 El barómetro de mercurio. El barómetro es un aparato que sirve para medir la presión atmosférica. Se usan actualmente dos tipos de barómetros, el barómetro de mercurio y el barómetro aneroides. El barómetro de mercurio fue inventado por un físico italiano, Evangelista Torricelli, hace unos 300 años. El experimento de Torricelli se ilustra en la figura 13D. Se llena con mercurio un tubo largo de vidrio, cerrado por un extremo,

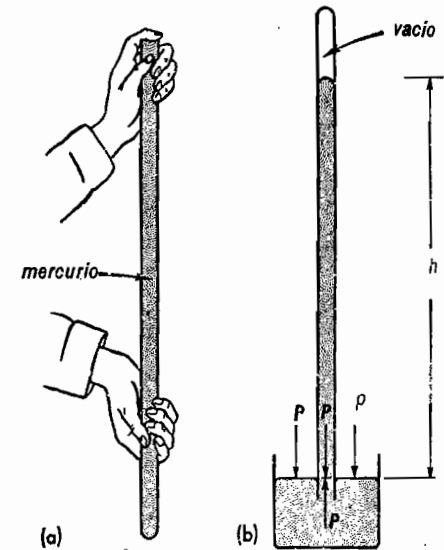


Fig. 13D. Experimento de Torricelli. Montaje de un barómetro de mercurio.

colocando el dedo sobre la boca, como un tapón, tal como se ilustra en el diagrama (a). Este tubo se invierte, y cuando su extremo abierto se sumerge en el mercurio que llena un vaso, se quita el dedo y queda como se ilustra en el diagrama (b). En el instante en que se quita el dedo, el nivel del mercurio baja dentro del tubo, y se estabiliza a una altura h . El mercurio baja hasta que la presión producida por su propio peso dentro del tubo (al nivel P) es igual a la presión atmosférica ejercida fuera del mismo.

La altura a que se estabiliza la columna de mercurio, experimentando al nivel del mar, es de unos 76 cm, ó 30 in. Esta altura será la misma, sin importar el diámetro del tubo o la longitud del espacio vacío que queda por encima del mercurio. El

TABLA 13A. MASAS Y PESOS ESPECÍFICOS DE SEIS GASES COMUNES

	Aire	CO ₂	Helio	Hidrógeno	Nitrógeno	Oxígeno
gm/cm ³	0.00129	0.00198	0.000178	0.00009	0.00125	0.00143
lb/ft ³	0.080	0.124	0.011	0.005	0.078	0.089

experimento de Torricelli demuestra que una columna de aire de 1 cm^2 de área transversal y que llega al extremo superior de la atmósfera, es igual, en peso, a una columna de mercurio de la misma sección transversal y 76 cm de altura.

Blas Pascal,* filósofo y matemático francés, fue el primero que demostró que, cuando se lleva un barómetro de mercurio a una gran altura, como la cumbre de una montaña, la altura de la columna de mercurio baja considerablemente. Desciende debido a que queda menos aire por encima de ese punto y por ello ejercerá una presión menor sobre la superficie libre del mercurio, fuera del tubo.

La fig. 13E es un diagrama de un experimento para demostrar que la atmósfera exterior es la que sostiene a la columna de mercurio del interior del tubo, al presionar hacia abajo sobre la superficie libre exterior del mercurio y que no influye el vacío existente en el espacio por encima de dicha columna. Se coloca un barómetro completo dentro de un cilindro alto y se extrae el aire mediante una bomba de vacío. Conforme el aire sale lentamente, la columna de mercurio baja de manera uniforme. Cuando se hace un vacío elevado en el cilindro, el nivel del mercurio dentro del tubo es el mismo que en el recipiente exterior. Si se deja regresar el aire, su presión fuerza al mercurio otra vez dentro del tubo y se le hace subir hasta la altura original h .

La altura del mercurio en el barómetro, mide directamente la presión atmosférica. Comúnmente, se acostumbra expresar la presión atmosférica en centímetros de la columna de mercurio, en vez de dar el valor de la presión en dinas/cm², ó lb/in². La presión expresada en centímetros de mercurio (el símbolo químico del mercurio

* Blas Pascal (1623-1662), filósofo religioso, físico y matemático francés. Principalmente notable por sus descubrimientos en matemática pura y por sus ensayos con el barómetro. Sus experimentos y su tratado sobre el equilibrio de los fluidos, hacen que se le considere, junto con Galileo y Stevinus, como uno de los fundadores de la ciencia de la hidrostática y la hidrodinámica.

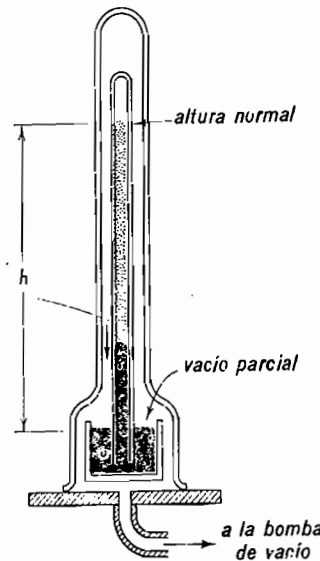


Fig. 13E. Demostración experimental de que la atmósfera es la que sostiene la columna de mercurio en el barómetro. Al extraerse el aire, baja esa columna.

rio es Hg), se tiene a la izquierda de la fig 13B para intervalos de 8 km.

Si se construyera un barómetro que usara agua en vez de mercurio, el tubo del mismo tendría que tener, por lo menos, una altura 13.6 veces mayor que la del barómetro de mercurio, o sea, 10.34 m. Este instrumento sería demasiado incómodo para aplicaciones prácticas.

13.4 El barómetro anerode. La conveniencia de tener un instrumento pequeño y portátil para la medida de la presión, llevó al desarrollo del barómetro anerode. Este aparato se usa frecuentemente como altímetro y barómetro combinados. En la fig. 13F se presenta una sección transversal del esquema de este aparato y en la fig. 13G (a) se reproduce una fotografía del mismo. Es una caja metálica plana y pequeña, de tapa flexible, y a la que se ha hecho el vacío, que en A se une a un sistema de palancas amplificadoras. El extremo del sistema de palancas se conecta a un pequeño cable, C, que está enrollado en torno a un eje, N, que lleva un

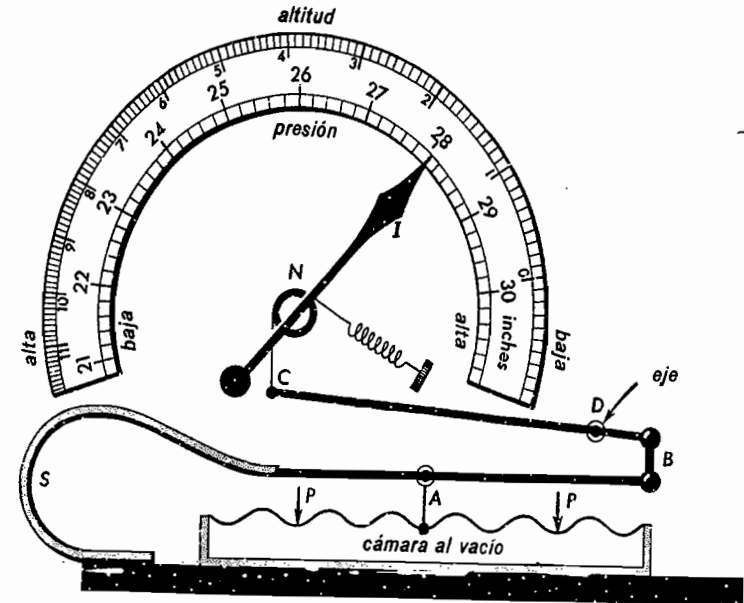


Fig. 13F. Corte transversal esquemático de un barómetro anerode.

indicador I. Si aumenta la presión atmosférica P , la tapa flexible es presionada hacia abajo en A. Esto hace bajar el extremo del sistema de palancas en B y, gracias al eje D, hace subir el punto C. El cable se enrolla en torno al eje N, haciendo girar el indicador I hacia la derecha de la escala, marcando una presión más alta. La escala del barómetro anerode se calibra por comparación con un barómetro de

mercurio, de manera que la presión está siempre dada en cm o en pulgadas de Hg.

Ya que la presión atmosférica disminuye conforme uno sube a mayores altitudes, el barómetro se usa con frecuencia para determinar la elevación. De hecho, los barómetros anerodes se construyen frecuentemente con una escala de altitudes junto con la de presiones. Estos instrumentos, llamados *altímetros*, se encuentran en el ta-

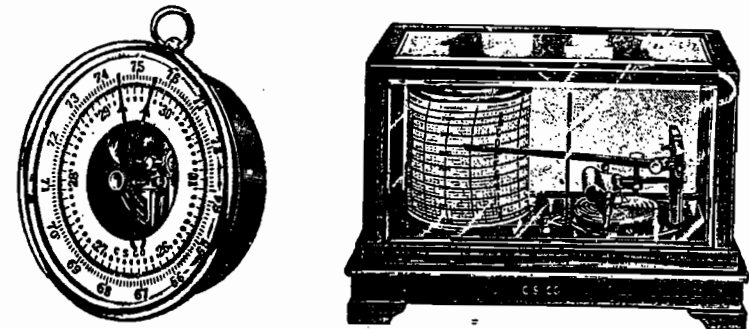


Fig. 13G. (a) Barómetro anerode usado para medir la presión atmosférica. (b) Barógrafo o barómetro registrador automático anerode.

blero de instrumentos de cualquier aeroplano o globo dirigible. Algunos de estos instrumentos son suficientemente pequeños para poderse llevar en el bolsillo como si fueran un reloj, y hay otros que son tan sensibles que pueden indicar cambios de elevación de 30 cm. La escala de alturas generalmente tiene la marca de *cero* cerca

de la presión correspondiente al nivel del mar, como se ven en la fig. 13F.

La presión atmosférica varía, no solamente con la altitud, sino también con el tiempo. Aunque estas últimas variaciones son pequeñas y no siguen ninguna ley regular, se pueden usar, y de hecho son usadas, por las estaciones meteorológicas

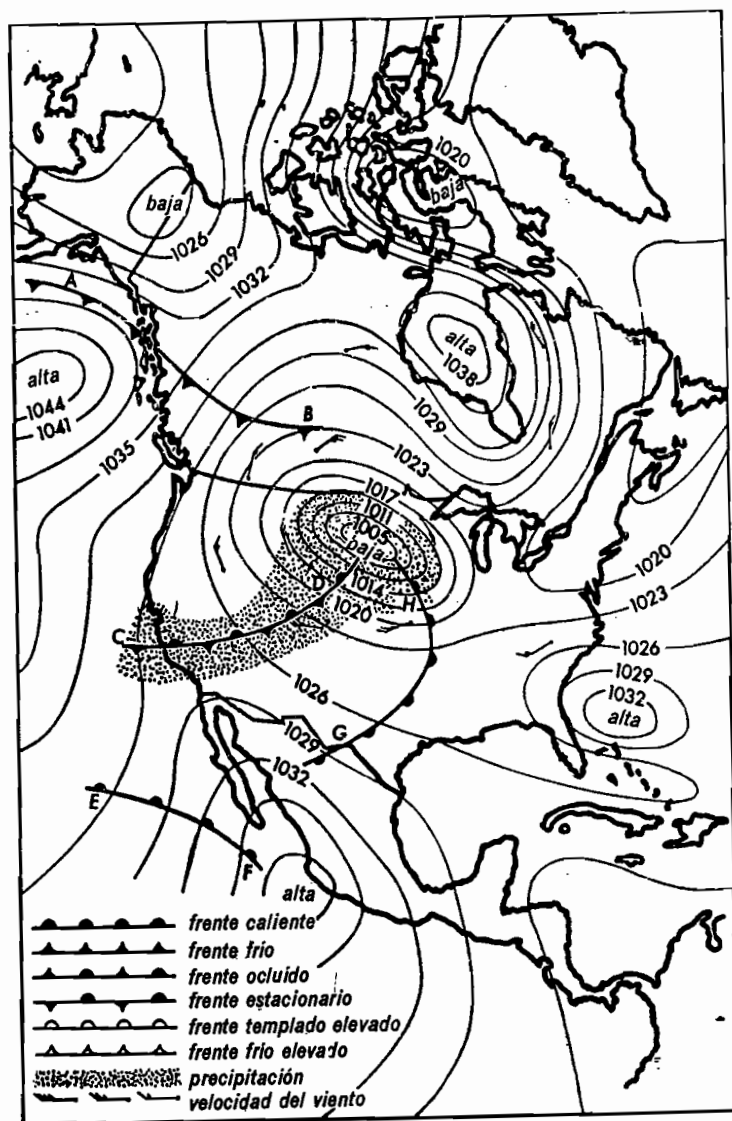


Fig. 13H. Mapa climático típico de Norteamérica

como ayuda para predecir las condiciones del clima. Si en un cierto lugar se mide cuidadosamente la altura exacta del barómetro, a lo largo del día y de las estaciones del año, se observarán ligeros cambios. Cuando empieza a disminuir la presión barométrica, se tiene una señal precisa de que va a cambiar el tiempo atmosférico. Si continúa bajando la presión, generalmente, se presenta la lluvia. Conforme pasa la tormenta, el barómetro vuelve a subir. Vemos que, por una cuidadosa observación de los cambios de la presión barométrica, un observador puede predecir el clima para ese lugar.

13.5 La presión atmosférica normal. La presión atmosférica normal se define como la presión equivalente a una columna de mercurio de 76 cm de altura, cuando la temperatura es de 0°C (29.92 in a 32°F). Para calcular la presión equivalente en dinas por centímetro cuadrado, se multiplica esta altura por la masa específica del mercurio y la aceleración debida a la gravedad.

$$76 \times 13.6 \times 980 = 1.013 \times 10^6$$

$$1 \text{ atmósfera} = 1.013 \times 10^6 \text{ dinas/cm}^2.$$

(13a)

En meteorología se acostumbra medir la presión atmosférica en bares y milibares.

$$1 \text{ bar} = 1\,000\,000 \text{ dinas/cm}^2,$$

$$1 \text{ milibar} = 1\,000 \text{ dinas/cm}^2.$$

Y, por tanto,

$$\begin{aligned} 1 \text{ atmósfera} &= 1\,013 \text{ bares} \\ &= 1\,013 \text{ milibares} \end{aligned}$$

(13b)

Las oficinas meteorológicas gubernamentales obtienen registros diarios de la presión barométrica en muchos lugares del país. Estos registros se obtienen automáticamente en cada estación, por medio de un barógrafo aneroide especial, como el que se ilustra en la fig. 13G (b). La pre-

sión se registra mediante el trazo que deja una pluma movida por el barómetro y que va grabándose sobre un papel enrollado en un tambor que gira lentamente, movido por un mecanismo de relojería. Todos esos registros se agrupan en la oficina meteorológica gubernamental y frecuentemente se publican mapas en que se señalan las regiones de presión uniforme en el continente norteamericano y lugares cercanos. En la fig. 13H se presenta uno de estos mapas, donde las líneas irregulares unen los puntos de igual presión. Los números con cuatro cifras significativas, que están en esas líneas, indican la presión en milibares (ver la ecuación 13b).

Las regiones de baja presión, que indican clima lluvioso, se mueven lentamente a través del mapa, a veces aumentando en intensidad y otras rompiéndose y desapareciendo. En este diagrama es especialmente notable el área de baja presión que está en la parte central al norte de los Estados Unidos. Alrededor de cada punto de muy baja presión, como éste, las masas de aire frío y caliente giran en dirección contraria a las manecillas del reloj.

Conforme bajan de los polos frentes de aire frío, tales como la línea AB, y avanzan contra las masas de aire caliente, como la línea EF, que vienen de las regiones ecuatoriales, empujan dicho aire caliente por delante de ellos y para arriba, hasta formar un frente estacionario del tipo ilustrado por CD. En ese lugar, el aire caliente que está arriba es enfriado por el aire frío que queda debajo; y, al llegar a temperaturas inferiores a la de saturación, se produce la precipitación de lluvia o de nieve. Las áreas de alta presión son índice de buen tiempo.

13.6 Experimentos para observar la presión atmosférica. La presión atmosférica normal de 1 millón de dinas/cm² (más exactamente 1 013 000 dinas/cm²), no produce la impresión de ser muy grande para una persona corriente; pero, si la consideramos actuando sobre una gran superficie, esta presión produce una fuerza

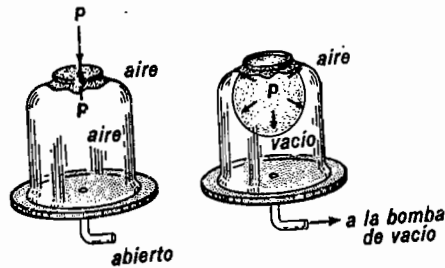


Fig. 13I. Experimentos que ilustran la magnitud de la presión atmosférica.

tremenda. Consideremos el bulbo al vacío de una lámpara incandescente de 8 cm de diámetro. Una esfera de este diámetro tiene un área aproximada de 200 cm^2 y, por tanto, se ejerce una fuerza total de 200 millones de dinas, o sea el peso aproximado de 200 kilogramos, empujando hacia dentro las paredes de la lámpara. Las paredes delgadas de vidrio, pueden resistir esta fuerza debido a que está distribuida de manera uniforme en toda la superficie. Si se aplicara en un solo punto, seguramente que rompería la lámpara. Un recipiente esférico o cilíndrico puede tener paredes delgadas y resistir enormes presiones, mientras que un recipiente de paredes planas, no las resiste. Por esta razón los recipientes grandes usados para almacenar líquidos o gases, tienen las paredes curvas, y no planas.

En la fig. 13I se presenta un experimento que ilustra la presión atmosférica. En el diagrama (a) hay una membrana delgada de goma elástica, atada sobre la boca de un frasco de vidrio.

Cuando se coloca la goma, la presión del aire dentro del frasco es la misma que fuera. Si ahora se suprime la fuerza interior hacia arriba mediante una bomba de vacío, la fuerza exterior empuja a la membrana hacia abajo, como se ilustra en el diagrama (b).

La fig. 13J explica el principio de la respiración en el cuerpo humano. La contracción muscular que lleva hacia abajo el diafragma, reduce la presión en los pul-

mones y entonces la presión atmosférica impulsa el aire hacia dentro de ellos. El regreso del diafragma hacia arriba, aumenta la presión y comprime los pulmones, haciendo salir al aire mezclado con bióxido de carbono.

En la fig. 13K se presentan otros dos experimentos. El primer diagrama representa un cilindro y su pistón en posición invertida. Bombeando el aire de la cámara del cilindro hacia fuera, la presión atmosférica levanta el pistón con los pesos W , colgados. Con un pistón circular, de sólo 12 cm de diámetro, se puede levantar un peso total de 1 500 newtons. El segundo dibujo representa lo que ocurre cuando se bebe agua de un vaso mediante una paja (popote). El agua no es extraída por medio de la paja, sino que es empujada desde el exterior. La succión en el extremo superior de la paja, extrae el aire y ello reduce la presión dentro de la misma; entonces la presión atmosférica en la super-

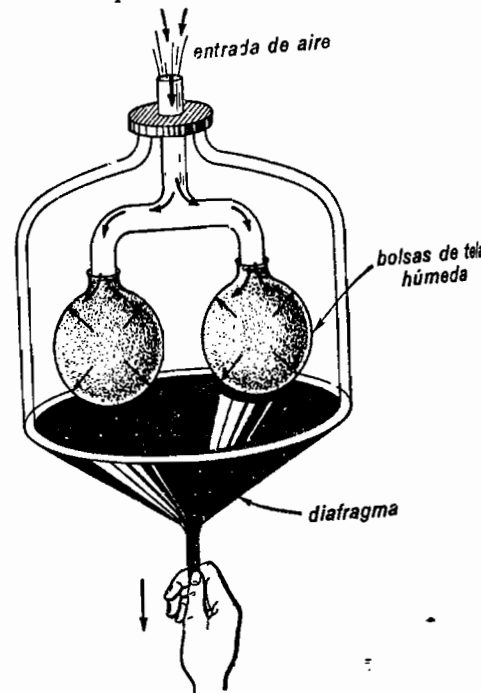


Fig. 13J. Demostración experimental de cómo respira el cuerpo humano.

ficie libre del líquido del vaso, impulsa el agua por el interior de la paja hacia arriba, hasta la boca. En cierta forma, funciona de manera semejante al sifón.

13.7 Los hemisferios de Magdeburgo. En 1654 Otto von Guericke * efectuó, en pre-

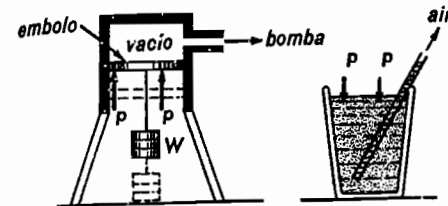


Fig. 13K. La presencia de la presión atmosférica y su acción en todas direcciones.

sencia del emperador Fernando III, en Regensburg, el famoso experimento de los hemisferios de Magdeburgo. Se juntaron

* Otto von Guericke (1602-1686), filósofo, abogado, físico y magistrado alemán. Incitado por los descubrimientos de Galileo, Pascal y Torricelli, produjo la primera bomba de vacío. A él se debe, en astronomía, la predicción del regreso periódico de los cometas.

dos hemisferios de cobre de unos 60 cm de diámetro, para formar una esfera, tal como se ve en la fig. 13L. Se puso entre ellos un anillo de cuero empapado en aceite y cera para que formara un cierre hermético. Después que se hizo el vacío dentro de la esfera, tiraron ocho caballos por lado, en sentidos opuestos de los hemisferios sin lograr separarlos. No es de admirar que esto sucediera, ya que la fuerza necesaria para separarlos, que se puede calcular fácilmente, llega a unas tres toneladas.

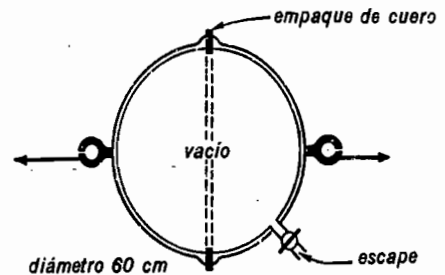


Fig. 13L. Los hemisferios de Magdeburgo, diseñados por Otto von Guericke.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes elementos: a) masa específica de un gas; b) presión atmosférica normal; c) bar, y d) milibar.

2. Trazar una gráfica de la presión atmosférica en centímetros de mercurio contra altitud en millas. Escala de millas de 0 a 25 horizontalmente y las presiones correspondientes en la escala vertical.

3. Explicar brevemente la construcción y principios de un barómetro de mercurio.

4. Hacer un diagrama de un mapa climatológico de Norteamérica como se presentaría en un día particular. Mostrar un área de ALTA presión de 1 206 milibares en el centro del mapa y una de BAJA presión de 1 002 en el noroeste sobre el estado de Washington.

5. Si se construye un barómetro usando alcohol en vez de mercurio, ¿de qué altura

será la columna de líquido si la presión atmosférica equivale a 76 cm de Hg? Ver la Tabla 12A. (Resp. 13.1 m.)

6. La pantalla circular de un cinescopio de TV tiene 20 in de diámetro. Ya que estos tubos tienen un vacío bastante completo, ¿cuál es la fuerza total sobre la pantalla? Suponer que la superficie es plana y la presión atmosférica es equivalente a 14.7 lb/in^2 .

7. Se hace el vacío a una esfera metálica hueca, de 10 cm de diámetro. Calcular la fuerza total hacia adentro sobre la superficie si la presión atmosférica equivale a 76 cm de Hg. (Resp. 3 182 newtons.)

8. Si se hacen unos hemisferios Magdeburgo con un diámetro de 10 in, ¿cuál es la fuerza mínima necesaria para separarlos si se ha hecho un vacío completo. Adopte la presión atmosférica como 14.7 lb/in^2 .

9. ¿Cuál será la presión barométrica media en milibares a una altura de 8 km sobre el nivel del mar? Ver la fig. 13B (*Resp.* 360 milibares.)

10. A un bulbo de vidrio hueco, con un diámetro de 12 in, se le hace el vacío. ¿Cuánto más pesará cuando esté lleno de aire a presión atmosférica normal y 0°C? Ver la Tabla 13A.

11. Un avión con cabina hermética mantiene una presión interior de 10 lb/in², cuando vuela a una altura de 16 km. Encontrar la fuerza total hacia afuera, ejercida sobre cada ventana rectangular de 12 in por 15 in. (*Resp.* 1 521 lb.)

12. Encontrar la presión total, en lb/in², sobre el fondo de una piscina donde el agua tiene 10 ft de profundidad. Considere la presión atmosférica normal actuando sobre la superficie del agua.

13. Un globo esférico, lleno con aire, tiene un diámetro de 60 ft. ¿Cuánto perderá de peso si se reemplaza el aire por helio? Considere presiones atmosféricas normales y 0°C de temperatura. (*Resp.* 7 804 lb.)

14. El cilindro y el pistón de la fig. 13K tienen un diámetro interior de 15 cm. ¿Cuál

es la carga máxima en kg, que puede levantar el pistón cuando se hace el vacío en el cilindro? Considere la presión atmosférica equivalente a 76 cm de Hg.

15. A un tubo cilíndrico de 12 in de diámetro, con placas planas de vidrio en los extremos, se le hace el vacío. ¿Cuál es la fuerza total hacia adentro ejercida por el aire exterior sobre cada placa de los extremos? (*Resp.* 1 693 lb.)

16. Si un bote cilíndrico de hojalata tiene 4 in de diámetro y 4 in de alto y se le hace el vacío, ¿cuál será la fuerza total sobre: a) cada extremo, y b) la pared lateral?

17. Un hemisferio de Magdeburgo, de 22 in de diámetro, tiene una placa de vidrio grueso colocada sobre su abertura y luego se le hace el vacío. Calcular la fuerza hacia adentro sufrida por el vidrio, suponiendo una presión atmosférica de 14.7 lb/in². (*Resp.* 5 587 lb.)

18. Si un barómetro contiene agua, en vez de mercurio, ¿a qué altura llegará la columna de agua a una altitud de 16 km? Ver la fig. 13B.

14

FLUIDOS EN MOVIMIENTO

El nombre de fluido se aplica a cualquier sustancia capaz de fluir, y comprenden tanto a los gases como a los líquidos. Ya que todos los líquidos tienen masa, la segunda ley del movimiento de Newton indica que se necesitan fuerzas no equilibradas para ponerlos en movimiento. Por ser de interés práctico, consideraremos varias maneras de obtener y aplicar estas fuerzas a los fluidos y qué factores regulan al movimiento resultante. Conviene que el estudiante recuerde en estas discusiones el hecho de que los líquidos son prácticamente incompresibles.

14.1 Velocidad de salida por un orificio. En muchas ciudades, los sistemas de abastecimiento almacenan agua en grandes depósitos, que se sitúan en lo alto de las colinas o bien sobre una torre, y de allí se lleva el agua por tuberías hasta las fábricas, comercios y hogares de toda la ciudad. Este modo de distribuir el agua se llama *sistema por gravedad*.

Cuando se abre un orificio en un lado de un recipiente que contiene un líquido, la velocidad con que fluye el líquido a través del orificio es mayor cuanto más abajo está el punto donde se hace la abertura. Aquí, la fuerza no equilibrada que pone en movimiento al líquido, es la gravedad a que actúa como la presión ejercida por el líquido. Ya hemos visto que la presión, a una cierta profundidad, es la misma en todas direcciones. A una profundidad h_1 (ver la fig. 14A), el líquido ejerce una presión p_1 contra las paredes y éstas ejercen otra presión igual y opuesta contra el líquido.

En el instante que se hace una abertura en el recipiente, la presión de la pared

desaparece en ese punto y la presión interior del líquido empuja a éste frente al agujero, dándole una aceleración hacia afuera perpendicular al plano de la abertura. Para encontrar la velocidad de salida,

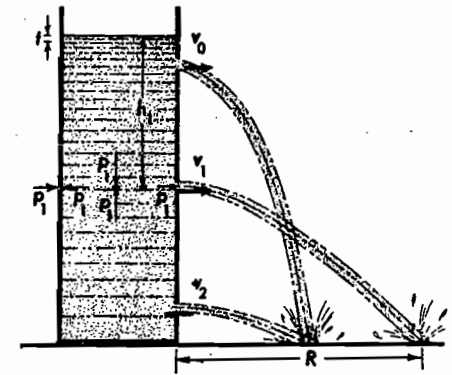


Fig. 14A. La velocidad de salida del agua por un orificio lateral, aumenta con la profundidad.

considérese la energía potencial del líquido que llena el recipiente cuando se abre el orificio; y luego, un poco más tarde, cuando se ha escapado una pequeña cantidad de líquido, bajando el nivel de la superficie libre en una distancia t .

Por lo que se refiere a la energía, el cambio efectuado es equivalente al descenso de la capa superior del agua una distancia h , siendo convertida su energía potencial mgh en la energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$ de la corriente que sale. Por la ley de la conservación de la energía,

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \quad (14a)$$

Ya que m es la misma en los dos lados de la ecuación, puede suprimirse m y se obtiene:

$$v = \sqrt{2gh}$$

(14b)

el mismo resultado que daría la ley de la caída libre de los cuerpos. En otras palabras, la velocidad de salida de un líquido a cualquier profundidad h , equivale a la velocidad que adquiriría por caída libre desde esa misma altura. Esta relación fue descubierta por Torricelli* y por ello se conoce como *teorema de Torricelli*.

Es interesante señalar que la trayectoria parabólica seguida por una corriente de líquido que sale a través de un orificio, es tal que el máximo alcance horizontal R (véase el diagrama) se obtiene con un orificio que esté a la mitad de altura entre el fondo y la superficie libre del líquido, y que los orificios equidistantes de él, por arriba o por debajo, de ese punto, tienen

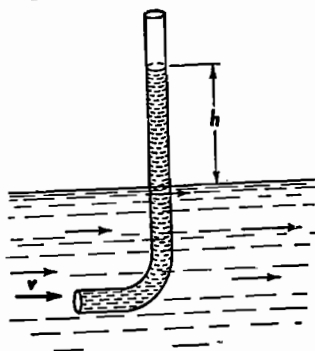


Fig. 14B. Con frecuencia se usa un tubo de Pitot para medir la velocidad del agua en una corriente.

alcances iguales entre sí, pero menores que el primero. Se deja como problema para el estudiante comprobar esta afirmación.

14.2 Medida de la velocidad de una corriente. Un método para medir las velocidades del agua en un arroyo o un río,

* Evangelista Torricelli (1608-1647), físico y matemático italiano discípulo de Galileo. Se le recuerda principalmente por sus artículos científicos sobre el movimiento de los fluidos, la teoría de los proyectiles y la óptica geométrica.

consiste en el uso de un tubo en forma de L , llamado *tubo de Pitot*. Ver la figura 14B. Si el agua estuviera en reposo, subiría en el brazo vertical hasta la misma altura del nivel de la superficie exterior.

La presión ejercida por la corriente en movimiento, hace que el agua suba a una altura h por encima de aquel nivel. Se verá que esto es el teorema de Torricelli a la inversa: la altura h mide la velocidad de la corriente en movimiento, por medio de la ec. (14a). Despejando h obtenemos:

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

(14c)

El segundo miembro $v^2/2g$, se llama *potencial de caída (altura dinámica)* de la corriente en movimiento.

El método más sencillo para medir la velocidad de un chorro de agua es dirigirlo verticalmente, hacia arriba, y calcular la velocidad a partir de la altura hasta la que sube, usando la ley de la caída libre de los cuerpos (ecuación 14b).

14.3 Flujo a través de una tubería. Uno de los factores que determinan el flujo del agua, aceite o gas a través de un conducto o el paso de la sangre a través de las arterias y venas del cuerpo, es la resistencia que oponen a la corriente las paredes que lo limitan. Considérese el experimento ilustrado en la fig. 14C, en que el agua de un depósito vertical que está a la izquierda se hace fluir a través de un tubo horizontal de vidrio conectado al fondo. Mediante tubos verticales, se mide la presión en cinco lugares a diferentes distancias del depósito, y se regula la velocidad de la corriente mediante la válvula del extremo derecho. Se mantiene la corriente de agua alimentando el recipiente y se tiene un vertedero abierto para que su nivel sea fijo, obteniéndose así una presión constante, y por ello un flujo uniforme.

Con la válvula cerrada, el agua *buscando su propio nivel*, sube en todos los tubos

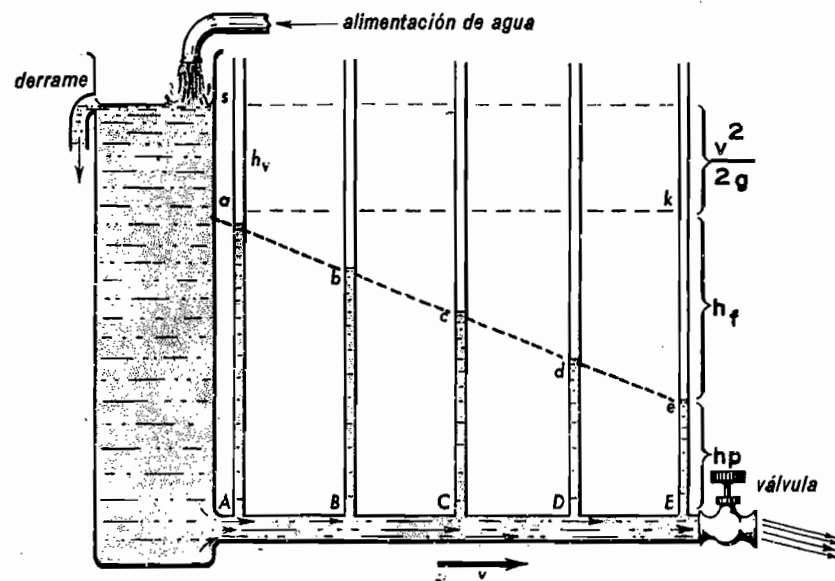


Fig. 14C. Flujo de agua por un tubo indicando la carga de velocidad h_v , la carga de rozamiento h_f y la carga de presión h_p .

verticales hasta el mismo nivel sr . Estas alturas iguales indican presiones iguales en todos los puntos a lo largo del tubo, desde A hasta E . Cuando se abre parcialmente la válvula y se obtiene una corriente continua, el agua de cada tubo vertical baja a distinto nivel en situación semejante a la ilustrada. Cuanto más se abre la válvula, más rápido es el flujo y más inclinada la pendiente de la recta $abcde$.

Como las alturas de las columnas aA , bB , cC , dD y eE miden en todo momento las presiones que hay en los puntos A , B , C , D y E , respectivamente, la línea recta ae indica un descenso uniforme a todo lo largo del tubo AE . Este descenso de presión, indicado en la figura con h_f , se debe al *rozamiento del fluido* dentro del tubo y se le llama *pérdida de carga por rozamiento*. Midiendo la pérdida de presión con diferentes velocidades de la corriente, puede verse por comparación de los resultados, que h_f es exactamente proporcional al cuadrado de la velocidad v . Esto puede expresarse en una ecuación.

$$h_f = Kv^2 \quad (14d)$$

donde K es la constante de proporcionalidad.

La caída de nivel desde s , en el depósito, hasta a , en el primer tubo vertical, mide la pérdida de presión en A , donde el agua está prácticamente en reposo en el recipiente y se le va a dar velocidad hasta un cierto valor v , al entrar en el tubo. Según dice el teorema de Torricelli, la pérdida de energía potencial de s hasta a , se convierte en energía cinética de la corriente, y por las ecuaciones (14b) ó (14c).

$$h_v = v^2/2g \quad (14e)$$

Aquí h_v es igual a sa y es el potencial de caída (carga por velocidad).

La presión final en el punto E , donde el agua está saliendo del tubo, se mide directamente por la altura de la columna de líquido eE , y se le llama carga de presión h_p . Resulta que la presión total h disponible en el depósito, se descompone, primero en una pérdida de carga por velocidad

h_v , luego en una pérdida de carga por rozamiento h_f , dando como presión final $h_p = h - h_v - h_f$. Para todos los puntos a lo largo de un tubo uniforme, la pérdida de carga por velocidad es constante, mientras que la pérdida por rozamiento aumenta proporcionalmente con la distancia que se ha recorrido desde la entrada del líquido.

Las ecuaciones anteriores se aplican también al flujo de los gases por tuberías, cuando la presión es relativamente pequeña. Si la presión es considerable, deben modificarse las ecuaciones para tomar en consideración la compresibilidad de los gases.

14.4 Viscosidad de los líquidos. Si se somete a presión un jarabe espeso o un aceite pesado y se le hace fluir a través de un tubo, no se obtendrá una rapidez de flujo tan grande como cuando se manda gasolina o agua por el mismo conducto con la misma presión total. Esta diferencia en la rapidez del flujo, se debe a la resistencia interna del fluido llamada viscosidad. En ciertos aspectos, la viscosidad se comporta en forma parecida al rozamiento entre los sólidos, pero en otros aspectos, en cambio, es bien diferente.

Considere el flujo lento y continuo del agua sobre el lecho arenoso de un río o arroyo. Vea la fig. 14D. Se encuentra

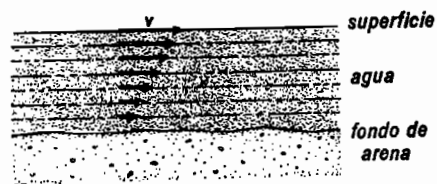


Fig. 14D. El agua de un río fluye más aprisa en la superficie.

que la velocidad del flujo es máxima en la capa superficial del líquido y disminuye a mayor profundidad, llegando a ser aproximadamente cero en el fondo.

Si imaginamos el agua dividida en capas delgadas, como se indica en la figura,

verá que el movimiento es tal que las capas se deslizan una respecto a otra. Debido a las fuerzas de atracción intermolecular, el lecho arenoso del río tiende a detener la capa sobre el fondo y evitar que se mueva; la capa líquida sobre el fondo, a su vez, tiende a detener a la segunda capa, y esta segunda capa detiene a la tercera, etc. Ya que la división en capas es arbitraria, vemos que debe haber fuerzas de rozamiento en todo el líquido que tienden a oponerse a su movimiento relativo. Cuanto mayor es la resistencia al movimiento, más grande es la viscosidad.

Se ilustra en la fig. 14E una demostración sencilla del efecto de la viscosidad en el flujo de un líquido en torno a un obstáculo. Dos pesos idénticos se sueltan si-

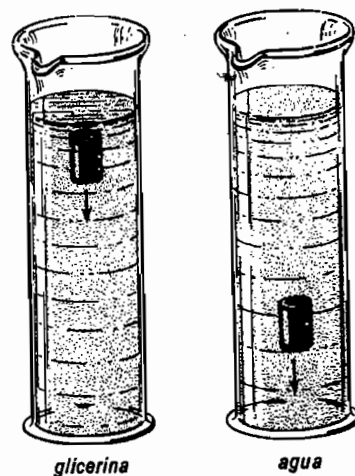


Fig. 14E. La rapidez con que cae un peso al fondo, da una medida de la viscosidad.

multáneamente, uno en agua y otro en glicerina. El peso que está en el agua se va más rápidamente al fondo, mientras que en la glicerina el descenso es muy lento.

En la fig. 14F, se señala una demostración de la viscosidad de los gases. Se suspende por el centro un disco de cartón mediante un hilo, colocándolo cerca de otro disco de madera, pero sin tocarlo. Cuando este último se pone en rotación rápida, el disco de cartón empieza a girar

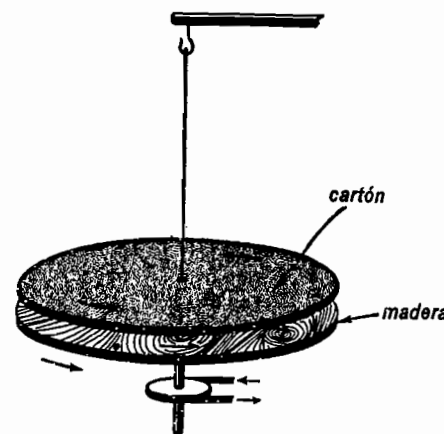


Fig. 14F. Debido a la viscosidad del aire, el disco de cartón es arrastrado por el disco que gira debajo de él.

en la misma dirección y gradualmente va ganando velocidad.

14.5 Medida de la viscosidad. El método más corriente para medir el coeficiente de viscosidad de los líquidos, es determinar la rapidez del flujo del líquido a través de un tubo de orificio relativamente estrecho (véase la fig. 14G). El rozamiento

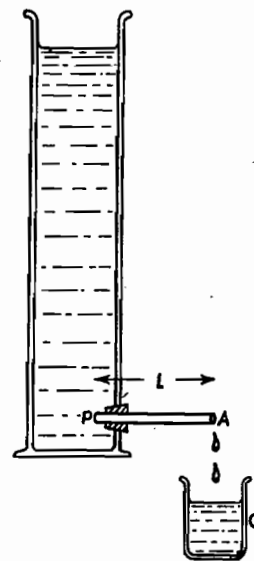


Fig. 14G. La viscosidad de un líquido se mide por la rapidez con que fluye por un tubo estrecho.

entre las secciones próximas del líquido y las paredes del tubo, tienden a detener el líquido.

Si imaginamos al líquido dividido en cilindros concéntricos, cada cilindro se irá deslizando longitudinalmente por dentro del otro, siendo máxima la velocidad del flujo en el centro y disminuyendo al alejarse del mismo para hacerse cero junto a las paredes del tubo. Este movimiento tiene cierta semejanza con el deslizamiento de las secciones tubulares que forman un telescopio plegadizo.

14.6 Principio de Bernoulli. Cuando un río corre por una llanura, el agua fluye lentamente; pero cuando pasa por una cañada estrecha, su velocidad aumenta. De modo semejante, cuando corre un líquido o un gas a través de un tubo y llega a una sección reducida, su velocidad aumenta al entrar en dicha angostura y disminuye de nuevo al salir por el otro extremo del paso estrecho. Esto se ilustra por el experimento presentado en la fig. 14H.

La instalación es igual a la que usamos en la fig. 14C, excepto por el hecho de que el tubo horizontal contiene una sección DE con la mitad de área transversal que el resto de la tubería. Cuando se abre la válvula y se produce una corriente continua, el agua de los tubos verticales habrá bajado de sr a los nuevos niveles a, b, d , etc., que se indican. Se debe notar que, cuando el agua entra al estrechamiento C, la velocidad del flujo aumenta y la presión disminuye de c a l . Más adelante, al salir del tubo estrecho en F, la velocidad disminuye y la presión sube de f a k .

Esto ilustra el principio de Bernoulli, que se puede expresar como sigue: en los lugares donde la velocidad del fluido es grande, su presión es baja, y donde la velocidad del fluido es pequeña, la presión es alta. Las caídas de presión de a a b , d a e y g a h , representan las cargas por rozamiento correspondientes a las secciones de tubo AB, DE y GH respectivamente. La caída de s a a , da directamente la carga por velocidad $v_1^2/2g$ para las secciones del

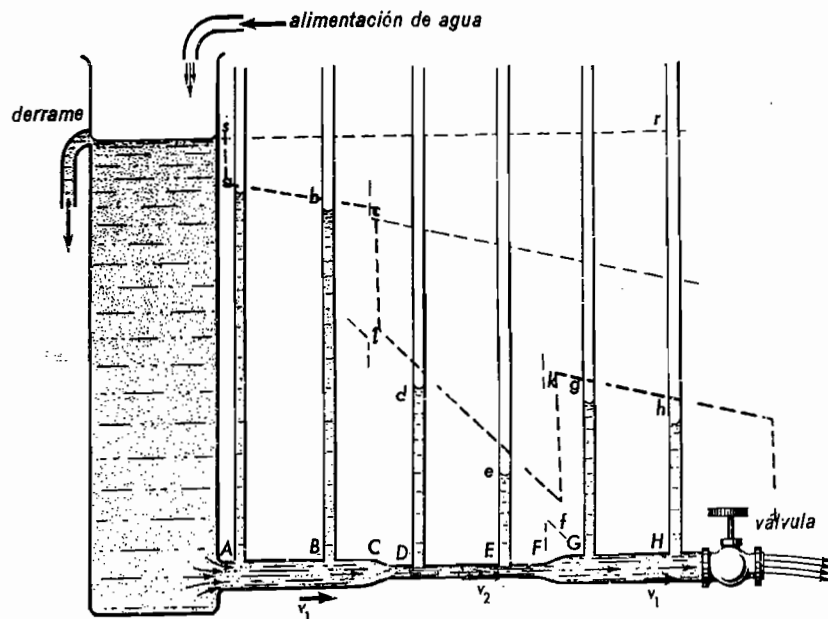


Fig. 14H. Al aumentar la velocidad del fluido, aumenta la pérdida de presión; y, donde la velocidad disminuye, la presión se eleva.

tubo AB y GH, y a ella se debe agregar la caída de c a l para obtener la carga de velocidad $v^2/2g$ en la sección del tubo DE. Se puede confirmar por simples medidas de laboratorio, que el resultado de la reducción del área transversal del tubo a la mitad, dobla la velocidad y cuadruplica la carga de velocidad.

14.7 Experimentos para ilustrar el principio de Bernoulli. El principio de Bernoulli es mencionado con frecuencia como una paradoja física, y es la base de mu-

chos fenómenos interesantes. Se describen en seguida varios experimentos en que interviene este principio. En la ilustración 14I (a), se lanza el chorro de aire de una boquilla entre dos hojas de cartón suspendidas a unos 7 cm de separación y soste-

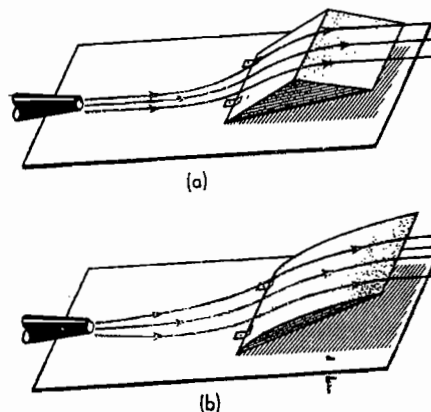


Fig. 14J. Experimentos que indican las fuerzas que levantan el techo y el ala de un avión cuando sopla una corriente rápida de aire sobre su cara superior.

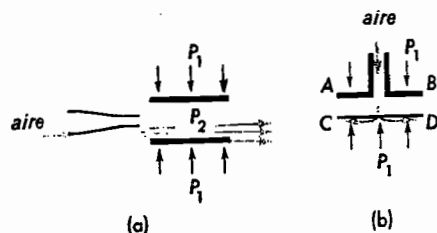


Fig. 14I. Demostraciones del principio de Bernoulli.

nidas mediante cuerdas. En lugar de que sean separados los cartones, como pudiera esperarse, se acercan uno al otro. La razón de esta acción, es que entre las dos hojas de cartón donde la velocidad del aire es grande, la presión p_2 es pequeña. En las superficies exteriores donde el aire no está en movimiento, la presión p_1 (presión atmosférica) es grande y empuja las hojas de cartón una hacia la otra.

En el segundo diagrama 14I (b), se sopla aire a través de un orificio en el centro de un disco AB. Cuando se coloca una pieza de papel CD cerca de la abertura, no resulta empujado por el chorro de aire, sino que es atraído hacia el disco. Donde la velocidad del aire entre el disco

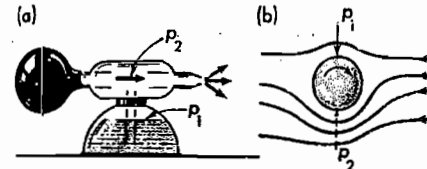


Fig. 14K. Demostraciones relacionadas con el principio de Bernoulli.

y el papel es grande, la presión es baja, y la mayor presión p_1 de la cara inferior del papel lo empuja contra el disco.

Con frecuencia se oye decir que, durante una tormenta, ciclón o huracán, son levantados los techos de algunas casas sin que sufra ningún otro daño la casa. Esto no es un accidente tan extraño como pudiera pensarse, ya que tiene una explicación sencilla. Un viento a gran velocidad, soplando sobre el techo, crea sobre éste una baja presión y la presión atmosférica dentro de la casa, donde no sopla el viento, levanta el techo y lo desprende. En la figura 14J se ilustra un excelente experimento para explicar este fenómeno. Se sopla un chorro de aire comprimido sobre la superficie de una tabla, en la cual se ha colocado un modelo de madera ligera simulando el techo de una casa o el ala de un avión fijo con bisagras contra la superficie de la tabla.

El diagrama (a) de la fig. 14K, representa un tipo corriente de pulverizador de perfumes. Al apretarse la perilla de goma, pasa una corriente de aire por el tubo central, creando una baja presión p_2 dentro de la conexión. La presión atmosférica p_1 sobre la superficie del líquido, empuja al líquido y lo hace subir por el tubo vertical para ser arrastrado hacia la derecha por la corriente de aire.

La mayoría de las pelotas tiradas por el lanzador en el juego de béisbol, describen trayectorias curvas, algunas hacia arriba o abajo, y otras hacia la izquierda o la dere-

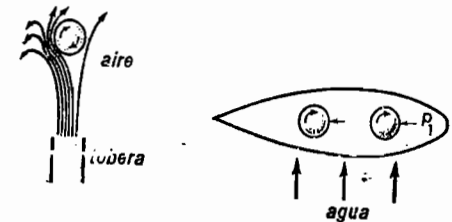


Fig. 14L. Demostraciones relacionadas con el principio de Bernoulli.

cha. Este es un arte logrado al lanzar las pelotas girando rápidamente en torno a determinado eje. Para producir una curva hacia abajo, se le da a la pelota una rotación en el mismo sentido del avance, tal como se indica en el diagrama (b) figura 14K. Para entender más fácilmente esta ilustración, podemos imaginar que, en vez de avanzar la pelota hacia la derecha, la suponemos detenida; pero todavía girando en torno a cierto eje y en medio de una

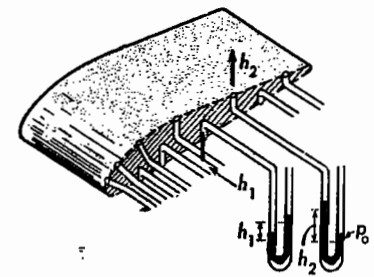


Fig. 14M. Montaje experimental de los manómetros de mercurio para medir la presión del aire en varios puntos del ala de un avión.

corriente de aire que va de derecha a izquierda.

En la superficie superior, donde el viento y la pelota se mueven en sentidos opuestos, el aire es retardado por el rozamiento, dando lugar a una región de alta presión. En la superficie inferior que se mueve para donde va el viento, éste mantiene alta su velocidad y crea una zona de baja presión. La fuerza resultante hacia abajo hará que la pelota caiga más aprisa de lo normal.

Si se coloca una pequeña pelota de ping pong en una corriente vertical de aire o de agua, subirá hasta cierta altura por encima de la boquilla y seguirá a ese nivel, girando y brincando sin caer. Si la pelota se va hacia un lado como se ilustra en la fig. 14L, el fluido que va por el lado izquierdo hace que la pelota gire según se indica en la figura. Siendo más elevada la velocidad en el lado izquierdo, se produce una baja presión. La alta presión del lado derecho, donde la velocidad es más lenta, empuja a la pelota otra vez al centro de la corriente de fluido.

Este mismo principio se ha aplicado a la nave Fletner, de rotores, que, en lugar de usar velas, emplea dos altos cilindros giratorios accionados por motores. Como se ilustra en el esquema visto desde arriba (fig. 14L), cuando el viento incide lateralmente al barco, se obtendrá un impulso

hacia adelante. Hace unos pocos años atravesó el Atlántico una nave de este tipo, llevando cargamento. Aunque tuvo éxito en sus viajes, la incertidumbre de contar con vientos fuertes impidió que se confiara en barcos de este tipo.

14.8 El efecto de sostén producido en el ala de un aeroplano. La mayor parte del efecto de sostén del ala de un aeroplano, se debe a su superficie superior. Este descubrimiento fue hecho en túneles aerodinámicos de laboratorio, montando secciones de ala en corrientes rápidas de aire y midiendo la presión de distintos puntos de la superficie, mediante manómetros. La figura 14M nos indica cómo se puede hacer esto con manómetros de mercurio conectados mediante tubos largos a los pequeños orificios de las superficies superior e inferior del ala.

Cuando el aire está quieto, todos los tubos de los manómetros marcan la misma altura en sus dos ramas y se tiene la presión atmosférica normal p_0 en todos los puntos dentro del ala hueca y también fuera de ella. Cuando se pone en movimiento la corriente de aire, los manómetros conectados a la superficie superior indican un descenso por debajo de la presión atmosférica, mientras que los que están en la superficie inferior indican un aumento de presión. Ya que la presión

atmosférica en la superficie exterior estaba equilibrada antes en todos los puntos por la presión atmosférica del interior del ala hueca, las lecturas manométricas h_1 y h_2 dan directamente las presiones resultantes sobre las cubiertas del ala en ambas superficies.

En la fig. 14N se da una representación gráfica de las presiones manométricas. Nótese el gran efecto que tiene en la superficie superior comparado con la inferior, principalmente en los puntos cercanos al borde delantero.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Se produce un agujero en la pared de una torre depósito de 20 ft por debajo de la superficie libre del agua. ¿Cuál será la velocidad con que sale el agua por el agujero. (Resp. 35.8 ft/seg.)
2. Se perfora un agujero en la pared de un tanque de agua 2.5 m por debajo de la superficie libre del agua. Encontrar la velocidad del agua que escapa por el agujero.
3. Se conecta un tubo horizontal corto al exterior de un tanque de agua a 8 ft por debajo de la superficie libre del agua. Si se hace un agujero por la superficie de arriba del tubo, a) ¿con qué rapidez escapará el agua? b) ¿a qué altura llegará a subir el chorro? (Resp. a) 22.6 ft/seg; b) 8.0 ft.)
4. Definir o explicar brevemente cada término de los siguientes: a) carga por velocidad; b) carga por fricción, y c) carga de presión.
5. Exprese el teorema de Torricelli y trace un diagrama que ilustre los principios que intervienen en dicho teorema.
6. Exprese el principio de Bernoulli y de algunos ejemplos prácticos de su aplicación.
7. Hacer un diagrama y explicar la dirección en que debe girar una bola de béisbol si el lanzador la hace curvar hacia un bateador derecho.
8. Haga un diagrama y explique por qué la forma de la superficie de encima del ala de un avión es de importancia para determinar su capacidad elevadora.
9. ¿Por qué es tan fácil que se levante el techo de una casa cuando ocurre un ventarrón de gran velocidad?
10. Hacer un diagrama y explicar los principios que intervienen en el funcionamiento de un pulverizador de perfume.

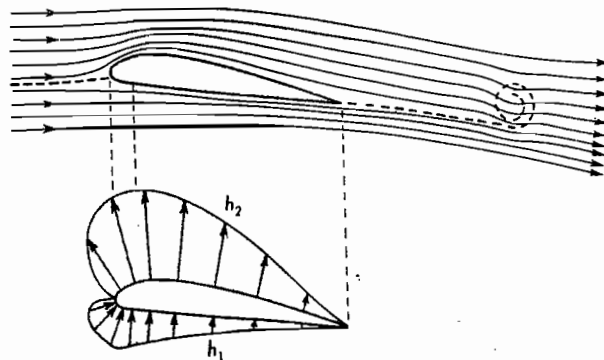


Fig. 14N. Diagramas de la corriente de aire y de la presión alrededor del ala de un aeroplano. Ángulo de ataque de 10°

TEMPERATURA Y DILATACION

La temperatura es una cantidad relativa y, al igual que el tiempo, es difícil de definir en términos sencillos. La palabra temperatura significa la intensidad del calor, y puede definirse como un número medido en una escala. Para ser más precisos, la temperatura absoluta de un cuerpo es pro-

porcional a la energía media de las moléculas que componen el cuerpo.

15.1 Termómetros. El primer registro auténtico de un termómetro se remonta a la época de Galileo. El termómetro de Galileo que se representa en la fig. 15A, consiste en un tubo estrecho de vidrio, con una abertura en un extremo y un bulbo en el otro. El extremo abierto del tubo se llena con agua coloreada y se invierte dentro de un vaso con agua. Cuando sube la temperatura del aire que rodea al termómetro, el aire de dentro del bulbo se dilata y fuerza al agua hacia abajo. Si se enfría el bulbo, el aire interior se contrae haciendo subir agua por el tubo (para más precisión, la presión atmosférica del exterior empuja al agua hacia arriba). Se puede agregar al tubo estrecho una escala graduada con cualquier escala de temperaturas, quedando las temperaturas bajas en la parte superior y las temperaturas altas en la parte inferior del tubo.

El más común de los aparatos medidores de temperatura, es el termómetro de mercurio. El termómetro de mercurio, como se ve en la fig. 15B, consiste en un tubo delgado de vidrio (tubo capilar), unido en su extremo inferior a un pequeño bulbo que tiene su extremo superior cerrado. El bulbo y una parte del tubo capilar se llenan de mercurio y se hace el vacío en la parte restante del tubo. Cuando sube la temperatura, el mercurio y el tubo de vidrio se dilatan. Como el mercurio se dilata más que el vidrio, sube a un nivel más alto dentro del tubo capilar. En el vidrio del tubo se graba una escala para leer las temperaturas.

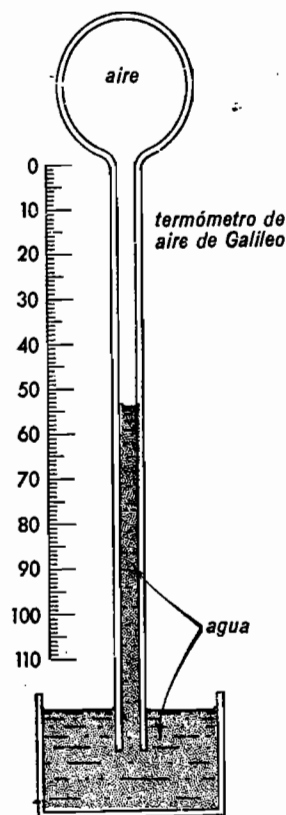


Fig. 15A. El aire se dilata al calentarse y empuja al agua hacia abajo. Al enfriarse, se contrae y sube el agua.

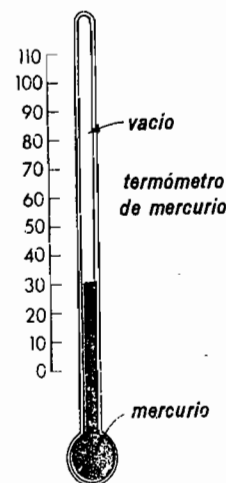


Fig. 15B. El mercurio del termómetro se dilata más que el tubo de vidrio y sube de nivel.

15.2 Escalas de temperatura. Actualmente se usan tres escalas diferentes de temperatura que son: la centígrada, la de Kelvin o absoluta, la de Rankine y la de Fahrenheit. Las tres escalas se indican en la fig. 15C. Los termómetros se fabrican de forma idéntica, aunque tengan diferente escala. Las escalas centígrada y de Kel-

vin o absoluta, son usadas en todo el mundo para medidas científicas, y en la Europa continental y los países iberoamericanos, también se usan en la vida diaria. La escala Fahrenheit se usa en la vida diaria, en los Estados Unidos de América y los países del Reino Unido, así como la Rankine en las mediciones de ingeniería.

Todos los termómetros que se encuentran en el comercio tienen grabada en el tubo una de estas escalas, y algunos dos de ellas.

Para graduar un termómetro, primero se pone el bulbo dentro de una mezcla de hielo y agua y se marca en el tubo la altura a que llega el mercurio. Después se coloca en vapor que se desprende de agua hirviendo y se señala el nuevo nivel. Estas dos marcas determinan los puntos fijos de la escala, que se vaya a usar después.

Entre la temperatura de fusión del hielo y la de ebullición del agua, hay un intervalo de 100 grados en las escalas centígradas y Kelvin y de 180 grados en las escalas Fahrenheit y Rankine. La relación de estos números es de 5:9, lo cual nos hace ver que un aumento de temperatura

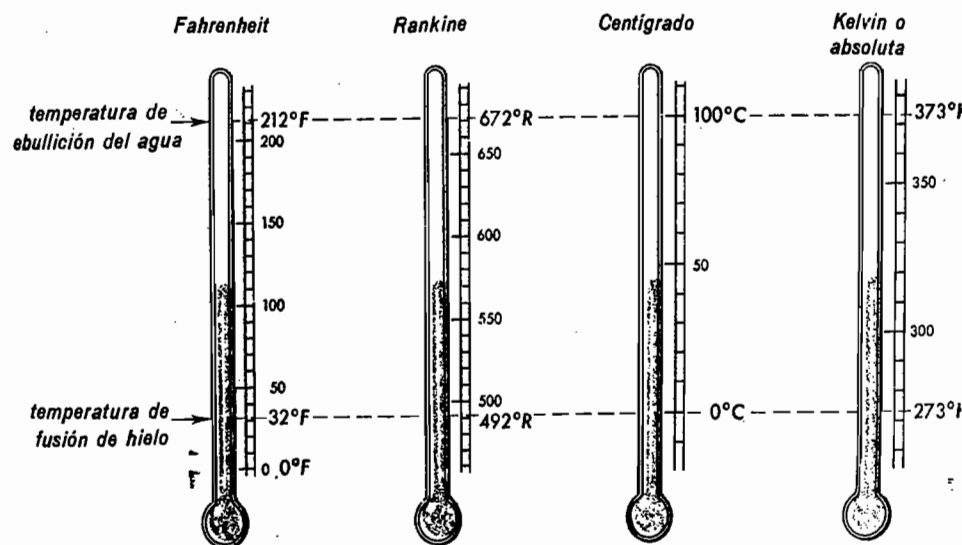


Fig. 15C. Termómetros de mercurio, ilustrando las tres escalas de temperaturas.

de 5°C ó 5°K equivale a una elevación de 9°F ó 9°R .

La temperatura más baja que se ha logrado alcanzar, es aproximadamente -273.16°C ó -459.69°F . Por razones teóricas que daremos más adelante, esta es la temperatura más baja que se podrá llegar a obtener. Las escalas Kelvin y Rankine empiezan con esta temperatura, la más baja posible, considerada como el *cero absoluto*. El punto de congelación del agua viene quedando en números enteros, en 273°K ó 492°R y la temperatura de ebullición del agua, en 373°K ó 672°R .

Con frecuencia se necesita transformar las lecturas de temperaturas de una escala a otra. En vez de desarrollar fórmulas para tales cambios, es más conveniente hacer las conversiones matemáticas guiándose por el diagrama de la fig. 15C.

15.3 Termómetros eléctricos. Si se va a medir una temperatura muy baja o muy alta, deben emplearse otros termómetros distintos al de mercurio. A temperaturas inferiores a -39°C , el mercurio se solidifica, y a temperaturas altas, se funde el

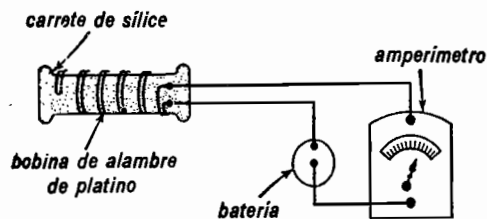


Fig. 15D. Termómetro de resistencia eléctrica con las conexiones entre la bobina de alambre de platino, la batería y el amperímetro.

vidrio. Para estas temperaturas extremas, se usan comúnmente termómetros eléctricos. Este instrumento opera basándose en el principio de que la resistencia que un alambre opone al paso de la corriente eléctrica a través de él, varía con la temperatura. A más alta temperatura, la resistencia es mayor.

En la fig. 15D se presenta el esquema de un termómetro eléctrico. Se enrolla un trozo de alambre de platino delgado en

un pequeño carrete de silice. Los extremos de este alambre se conectan a una batería y a un amperímetro. La batería tiene por objeto dar corriente eléctrica y el amperímetro determinar el valor exacto de la corriente. Cuando se va a medir la temperatura de un cuerpo caliente, por ejemplo un horno, se coloca dentro del horno el carrete con alambre de platino, y se deja afuera la batería y el amperímetro.

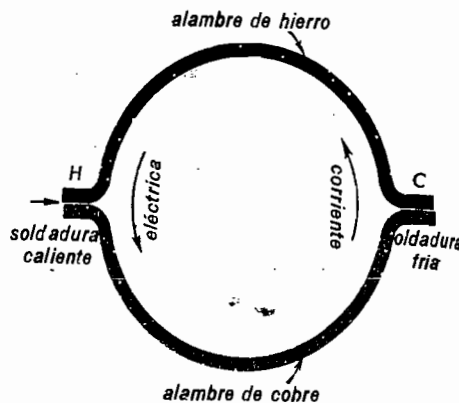


Fig. 15E. Un termopar.

La elevación de temperatura hace que la resistencia del alambre de platino aumente y, por tanto, disminuya la corriente. Cuando el alambre de platino toma la temperatura del horno, su resistencia permanece en un valor constante y la aguja del amperímetro indica un valor fijo de la corriente. En muchos casos, la escala del amperímetro se gradúa para que dé directamente la temperatura en grados.

En la fig. 15E se ve otro tipo de termómetro eléctrico, llamado *par termoeléctrico* (termocuple o termopar). Este aparato registrador de temperaturas, se basa en un principio descubierto en 1821 por Seebeck, conocido como el *efecto termoeléctrico*. Se unen por sus extremos dos piezas de alambre, una de cobre y otra de hierro, para formar una espira cerrada. Cuando una de las uniones se calienta y la otra se mantiene fría, fluye una corriente por la espira, en la dirección indicada por las flechas. Cuanto mayor es la diferencia

de temperaturas entre las dos uniones, más grande es la corriente eléctrica.

El diagrama de la fig. 15F representa un termopar conectado a un amperímetro. Si la unión del termopar se coloca primero

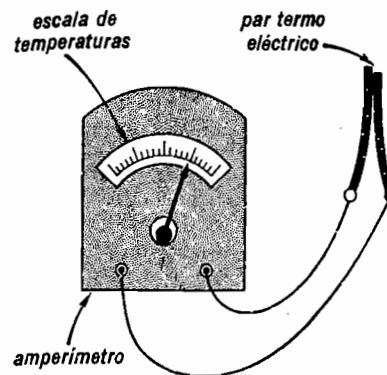


Fig. 15F. Un termómetro de termopar.

en hielo fundente y después en agua hirviendo, se pueden marcar las lecturas del amperímetro, como 0°C y 100°C . Esto calibra el instrumento, dándonos un termómetro de lecturas directas.

Los termopares pueden ser de otros metales distintos. Cualquier par de metales que se pongan en contacto, presentarán el efecto termoeléctrico. Hay algunos pares de metales que producen corrientes más intensas. Cuando se van a medir temperaturas muy altas, se usan pares de platino y platino-iridio, debido a su alta temperatura de fusión.

Si se conecta un grupo de termopares como se indica en la fig. 15G, forman lo

que es, en general, llamada una *termopila*. Se unen pequeñas barras de dos metales diferentes colocadas alternadamente como se ve en el diagrama (b). Un grupo de uniones queda protegido poniéndolo en la parte de atrás de una pequeña caja, y el otro grupo de uniones se expone a los rayos caloríficos, a través del frente que se deja abierto. Mediante un reflector de forma cónica, para recoger más rayos caloríficos de un objeto distante, se aumenta el valor de la corriente eléctrica. Las termopilas que tienen varios cientos de elementos, se pueden hacer tan sensibles que detecten el calor de la llama de una vela a varios cientos de metros de distancia.

15.4 Dilatación térmica de los sólidos. Cuando un objeto se calienta, ya sea sólido, líquido o gaseoso, en general se dilata. Hay muy pocas excepciones a esta regla. Puede demostrarse la dilatación de un sólido con la elevación de temperatura por el calentamiento de un alambre largo y la medida de su alargamiento total. En la fig. 15H se ve un dispositivo experimental para demostrar esto. Un alambre

de hierro de unos 2 m de longitud se une a un gancho A por un extremo, y a un peso W por el otro extremo. Entre estos dos puntos se pasa el alambre por varias poleas B, C y D. Haciendo pasar una corriente a través del alambre, y procedente de una batería, se consigue que éste se caliente.

El alambre se alarga conforme se calienta y el peso baja lentamente, haciendo

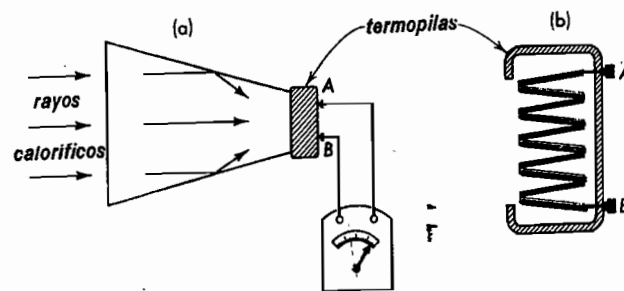


Fig. 15G. Sección transversal de una termopila para medir la radiación térmica de cuerpos calientes.

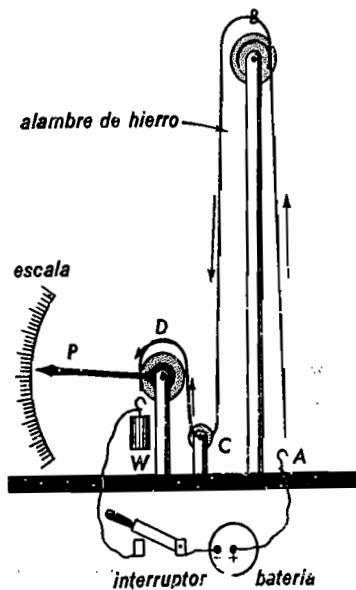


Fig. 15H. Dilatación de un alambre debido a una elevación de la temperatura.

gíran las poleas y la aguja indicadora *P*. Abriendo el interruptor se quita la corriente; el alambre se enfría y al mismo tiempo se contrae a su longitud original. Las medidas precisas de los cambios de temperatura y de los alargamientos de varillas sólidas, son realizadas en laboratorios bien equipados. La gráfica de la fig. 15I, representa la relación rectilínea que hay entre la elevación de la temperatura y el alargamiento. Se entiende por alargamiento o elongación, el aumento de longitud y

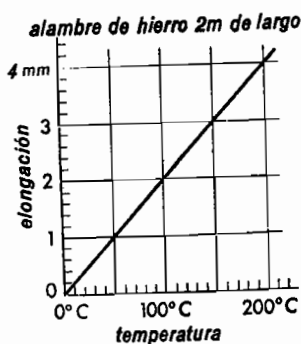


Fig. 15I. Gráfica de la dilatación de un alambre.

no la longitud total del alambre. Para un alambre de hierro de 2 m de largo, una elevación de temperatura de 50° C produce un alargamiento de 1 mm; 100° C producen un alargamiento de 2 mm; 150° centígrados, un alargamiento de 3 mm, etcétera. La línea recta significa que la elongación es directamente proporcional al cambio de temperatura.

Hay muchos casos en los trabajos de ingeniería, donde la dilatación de los sólidos es un factor de importancia en el diseño y construcción de máquinas o edificios. Esto es particularmente cierto en la construcción de puentes colgantes y de vías de ferrocarril. Cuando fueron colocados los rieles de acero para las vías de los primeros ferrocarriles, se dejaron pequeños intervalos en cada unión. La razón de ello es que en el verano los rieles se dilatan al subir la temperatura y cierran estos huecos. Si los intervalos no son suficientemente grandes en el invierno, el riel se podrá deformar al llegar el verano y provocar serios accidentes. Cuando los rieles se contraen en el invierno y esos espacios se hacen más anchos, producen bastante ruido al pasar sobre ellos el tren.

No todas las sustancias se dilatan en la misma proporción cuando se calientan

TABLA 15.A. COEFICIENTES LINEALES DE DILATACIÓN TÉRMICA (en grados centígrados)

Material	α por °C
Aluminio	25×10^{-6}
Acero	18×10^{-6}
Bronce	17×10^{-6}
Cobre	17×10^{-6}
Cuarzo	3×10^{-6}
Hierro	14×10^{-6}
Oro	11×10^{-6}
Pino (veta a lo largo)	9×10^{-6}
Pino (veta cruzada)	11×10^{-6}
Platino	0.4×10^{-6}
Vidrio común	5×10^{-6}
Vidrio pyrex	30×10^{-6}

a una misma diferencia de temperaturas. Esto es señalado por los coeficientes lineales de dilatación térmica que se dan en la Tabla 15A.

El coeficiente lineal de dilatación térmica α , se define como el cambio de longitud de la unidad de longitud original de una sustancia por cada grado de elevación de su temperatura. Una vez conocida esta constante, puede calcularse la dilatación lineal de cualquier objeto hecho del mismo material, para cualquier cambio de temperatura, usando la fórmula siguiente:

elongación

$$= \alpha \times \text{longitud} \times \text{elevación de temp.}$$

$$e = \alpha L(t_2 - t_1) \quad (15a)$$

En esta ecuación, t_1 es la temperatura original del cuerpo, t_2 la temperatura a la que se lleva, y L es la longitud original.*

Ejemplo 1. Se corta y pule una varilla de vidrio pyrex a una longitud de 10 cm cuando la temperatura ambiente es de 20°C. Si se calienta esta varilla a una temperatura de 420°C, ¿cuánto se alargará?

Solución. Usando la ecuación anterior, obtenemos:

$$e = 3 \times 10^{-6} \times 10 \times (420 - 20) \\ = 3 \times 10^{-6} \times 10 \times 400 = 0.012 \text{ cm}$$

La varilla se alarga sólo 0.012 cm para dar una longitud total de 10.012 cm. Debe

* En las ecuaciones se acostumbra usar la letra t para las temperaturas en la escala centígrada o Fahrenheit. Cuando se usan temperaturas absolutas, se emplea la letra mayúscula T .

notarse que, si la longitud de la varilla se hubiera dado como 10 in, el alargamiento hubiera sido 0.012 in. En otras palabras, e y L están siempre en las mismas unidades, de manera que el coeficiente lineal de dilatación térmica es válido en el sistema métrico de unidades y también en el sistema inglés. Los coeficientes dados en la Tabla 15A son para temperaturas medidas en la escala centígrada. Si la temperatura está en grados Fahrenheit, se debe hacer antes la conversión de temperaturas a la escala centígrada.

15.5 Dilatación diferencial. En la sección anterior se estableció que todas las sustancias tienen diferente dilatación. Algunos metales, como el bronce y el aluminio, se dilatan dos veces más que otros como el hierro y el platino (ver la Tabla 15A). Esta diferencia de dilatación se determina por el calentamiento de una cinta bimetalica como se muestra en la figura 15J (a). Se colocan dos cintas delgadas de diferentes metales, una junto a la otra, y se sueldan a todo lo largo. Cuando se calientan, un metal se dilata más que el otro, haciendo que la cinta se flexione. Cuanto más se calientan, mayor es su flexión. Cuando se enfrían hasta su temperatura original, la cinta vuelve a quedar recta y si se enfría más, se flexiona en la dirección opuesta.

La dilatación diferencial observada en este experimento, tiene muchas aplicaciones prácticas en la industria. Las cintas bimetalicas son usadas, por ejemplo, en la construcción de volantes para relojes finos y para los termostatos de los refrigeradores.

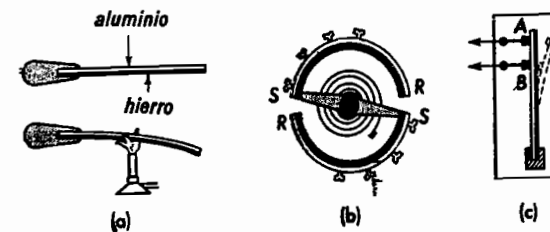


Fig. 15J. Las sustancias diferentes se dilatan en proporción diversa. (a) cinta bimetalica, (b) volante de reloj, (c) termostato.

res, calentadores de agua y radiadores de automóvil. En un día caliente, los radios del volante del reloj se dilatan, por lo cual la masa de la rueda se aleja del centro, haciendo que el volante oscile más lentamente. Si la rueda está formada por cinta bimetalica, se compensa esto, como se ve en la fig 15J (b). Con la elevación de la temperatura, los extremos de los radios S se alejan del centro y los extremos libres, R , de la cinta bimetalica, se flexionan más cerca del eje de rotación. Una dilatación compensa a la otra y logra que el reloj siga moviéndose al mismo paso.

Actualmente es muy común el empleo de los termostatos en aparatos eléctricos, y por eso explicaremos aquí su funcionamiento. Un termostato eléctrico es un interruptor eléctrico automático que se cierra cuando la temperatura llega a un cierto grado, y se abre cuando llega a otro. En la fig. 15J (c) se ve uno de estos interruptores. Si la temperatura es baja, la cinta bimetalica está recta y conecta los puntos A y B . Esto hace trabajar un aparato eléctrico que, por ejemplo, puede abrir una válvula de gas y prender un calentador en el sótano de la casa. Cuando el aire de la casa llega a la temperatura deseada, la cinta bimetalica se flexiona lo suficiente para interrumpir el contacto eléctrico entre A y B y apagar el calentador. Cuando el aire vuelve a enfriarse, la cinta se endereza y hace contacto, volviendo a encender el calentador.

15.6 Dilatación de superficie y de volumen. Cuando se eleva la temperatura de un alambre, no sólo aumenta de longitud, sino que también aumentan su diámetro y sección transversal. Cuando se calienta un disco, aumenta de radio y área, mientras que una esfera o un cubo aumentan de volumen. En las sustancias isotropas, como el cobre, la dilatación lineal tiene lugar del mismo modo en todas direcciones. En las sustancias anisotropas, como la madera, la dilatación perpendicular a la veta es muy diferente a la dilatación paralela a la misma (ver la tabla 15A).

Para encontrar el aumento de área o de volumen de estos materiales debe aplicarse en cada dirección por separado la fórmula de la dilatación lineal, ecuación (15a) (ver la fig. 15K). Se puede aplicar el

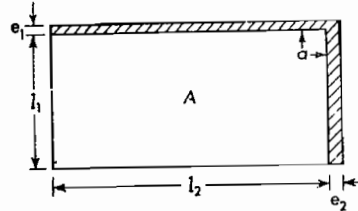


Fig. 15K. Dilatación térmica de una superficie.

mismo procedimiento a las sustancias isotrópicas, pero se pueden hacer cálculos más rápidos con las ecuaciones siguientes.

Para la dilatación de área de un medio isotrópico.

$$a = 2\alpha A(t_2 - t_1) \quad (15b)$$

donde A es el área original de la superficie; a , el aumento de área debido a la dilatación; α , el coeficiente lineal de dilatación, y $t_2 - t_1$ el aumento de temperatura.

Para la dilatación cúbica de un medio isotrópico,

$$v = 3\alpha V(t_2 - t_1) \quad (15c)$$

donde V es el volumen original del sólido, v el aumento de volumen, y los símbolos restantes son los mismos usados antes.

La cavidad de una esfera hueca o de cualquier recipiente, se dilata como si fuera una pieza sólida del mismo material. Por ejemplo, un vaso de platino que tenga una capacidad de 1 000 cm³ a 0° C, al calentarse a 100° C, tendrá el siguiente aumento de capacidad:

$$v = 3 \times 9 \times 10^{-6} \times 1000 \times (100 - 0) = 2.7 \text{ cm}^3$$

Su nueva capacidad será 1 002.7 cm³

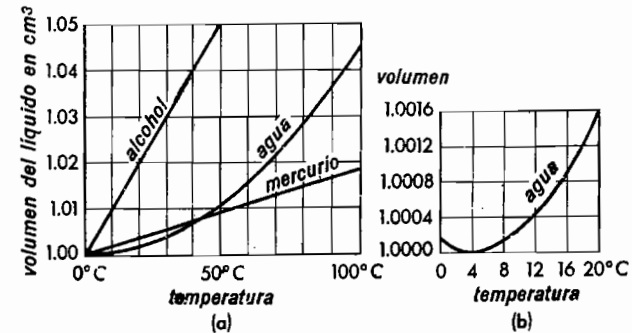


Fig. 15L. Gráfica volumen-temperatura para la dilatación térmica de líquidos.

La siguiente pregunta se deja como problema para que la conteste el estudiante. Si se eleva la temperatura de una arandela de cobre, es decir, un disco de cobre que tiene un agujero en el centro, el agujero del centro ¿se hace mayor o menor?

15.7 Dilatación térmica de los líquidos.

La medida exacta de la dilatación de los líquidos con la elevación de la temperatura, se hacía difícil por la dilatación simultánea del recipiente que contiene al líquido. Se puede vencer esta dificultad, y entonces se encuentra que la mayoría de los líquidos, al igual que los sólidos, se dilatan en una cantidad que es proporcional a la elevación de temperatura. Esto se ilustra por las gráficas rectilíneas del alcohol y del mercurio en la fig. 15L.

Aquí las gráficas rectilíneas significan que, con cada grado de elevación de temperatura, el aumento de volumen debido a la dilatación es exactamente el mismo. Si 1 cm³ de mercurio a 0° C es calentado a una temperatura de 1° C, su volumen será 1.00018 cm³, o sea un aumento de 0.00018 cm³. A los 10°, el aumento será 10 veces mayor, o sea, 0.0018 cm³. Entonces, a cada grado de elevación de temperatura, el volumen aumenta en la misma cantidad de 0.00018. Este número se llama *coeficiente volumétrico de dilatación térmica* del mercurio. Para el alcohol, este coeficiente vale 0.0011 por cada grado centígrado.

TABLA 15B. COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE DILATACIÓN DE LÍQUIDOS

Líquido	por °C	por °F
Alcohol	11.0×10^{-4}	6.6×10^{-4}
Glicerina	5.3×10^{-4}	2.9×10^{-4}
Mercurio	1.8×10^{-4}	1.0×10^{-4}
Trementina ..	10.5×10^{-4}	5.8×10^{-4}

La dilatación cúbica de los líquidos del tipo del mercurio o del alcohol, se obtiene con una ecuación que tiene la misma forma que la usada para los sólidos (ver la ec. 15a).

$$v = \beta V(t_2 - t_1) \quad (15d)$$

donde v es el cambio de volumen; β el coeficiente volumétrico de dilatación térmica; V el volumen original, y $t_2 - t_1$ el cambio de temperatura.

15.8 Dilatación anormal del agua. Entre límites de temperatura muy separados, los líquidos no se dilatan siguiendo una ley lineal. En realidad, su gráfica se desvía ligeramente hacia arriba, indicando un aumento más rápido de volumen a altas temperaturas. Para diferentes líquidos, el alejamiento de su gráfica de la forma rectilínea es muy diferente. A 100° C, por ejemplo, el alcohol se dilata un 20% más para cada grado de aumento de temperatura que lo que se dilata a 0° C. Por otra parte, el mercurio varía en menos de un

centésimo de un 1% y puede considerarse casi lineal entre las dos temperaturas, 0° y 100° .

Empezando en la temperatura de congelación del agua a 0°C , y calentándola lentamente, el agua se contrae hasta que llega a la temperatura de 4°C y luego se dilata. A 4°C , en que llega a su volumen mínimo, alcanza su máxima densidad. Se debe considerar como una circunstancia muy afortunada que el agua se dilate al ser enfriada de 4°C a 0°C . Si no fuera así, y se contrajera como sucede con la mayoría de los líquidos, el hielo empezaría a formarse del fondo de los lagos hacia arriba, en vez de congelarse desde la superficie, como ocurre.

Cuando un estanque se enfría tendiendo a la temperatura de congelación, se enfría

primero la superficie del agua que está en contacto con el aire frío. Habiéndose enfriado y contraído, tendrá mayor densidad que el agua que está debajo de ella y se irá al fondo. Este proceso continúa hasta que toda el agua llega a 4°C ; pero cuando el agua de la superficie se enfría a más de 4°C , se dilata y se hace menos densa, y por ello se queda arriba. El agua de la superficie puede llegar a 0°C y congelarse antes que el agua de abajo. El agua se dilata más aún al congelarse para convertirse en hielo. El hielo flota sobre el agua porque su densidad es menor que la del agua. Cuando 1 cm^3 de agua a 4°C se enfría hasta 0°C y se congela, se dilata un 9%. Su nuevo volumen como sólido, a 0°C , es de 1.09 cm^3 .

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Explicar brevemente los principios de un termopar. Hacer un diagrama.

2. Explicar brevemente los principios de un termómetro eléctrico de resistencia. Hacer un diagrama.

3. Nombre e ilustre en un diagrama las cuatro escalas termométricas comunes.

4. Explique la dilatación diferencial. ¿Qué usos prácticos se han hecho de la dilatación diferencial? Hacer una diagrama de una aplicación.

5. Un termómetro centígrado muestra una temperatura de 75°C . ¿Cuál debe ser la lectura Fahrenheit en el mismo lugar? (Resp. 167°F .)

6. Si un termómetro centígrado muestra una temperatura de 25°C , ¿cuál es su temperatura equivalente en la escala Rankine?

7. ¿Qué temperatura centígrada equivale a cada una de las siguientes: a) 86°F ; b) 122°F ; c) 158°F ; d) 176°F , y e) -22°F ? (Resp. a) 30°C ; b) 50°C ; c) 70°C ; d) 80°C , y e) -30°C .)

8. ¿Qué temperatura de la escala Fahrenheit equivale a cada una de las siguientes:

a) 25°C ; b) 30°C ; c) 75°C ; d) 150°C , y e) 380°C ?

9. Los rieles de hierro de un tranvía son de 40 ft de largo. Si al tiempo que son clavados en su lugar la temperatura es de 55°C , ¿cuán grandes serán los huecos entre los extremos de los rieles cuando la temperatura baje a 20°C ? (Resp. 0.185 in.)

10. Una torre de acero es de 500 ft de alto. ¿Cuál es la variación de altura entre las temperaturas de 0°C y 40°C ?

11. Una cinta de acero mide 100 ft de largo cuando la temperatura es de 27°C . Encontrar su cambio de longitud si la temperatura baja a 10°C . (Resp. 0.224 in.)

12. Un automóvil mide 18 ft de largo. Suponiendo que fuera todo de hierro, encontrar su cambio de longitud cuando la temperatura sube de 20°F a 110°F .

13. Una botella grande de vidrio común, contiene 5 galones de trementina cuando la temperatura es de 95°F . Encontrar la pérdida aparente de volumen cuando la temperatura baja a la de congelación del agua. (Resp. 0.174 gal.)

14. Un tanque de almacenamiento contiene 220 galones de alcohol cuando la temperatura es de 15°C . Encontrar el aumento de volumen cuando la temperatura sube a 42°C .

15. Un tanque de acero completamente lleno a 20°C contiene 450 galones de alcohol. Si la temperatura sube a 40°C , ¿cuántos galones de alcohol se derramarán? (Resp. 9.60 gal.)

16. Un tanque de aluminio completamente lleno a 30°C contiene 6 m^3 de trementina. Si la temperatura baja a 0°C ,

¿cuánta trementina extra se necesitará para llenar el tanque?

17. Una cubierta de mesa de pino mide 10 ft de largo y 3 ft de ancho. Si la fibra va a lo largo de la mesa, encontrar el aumento de área correspondiente a una elevación de temperatura de 30°C . (Resp. 4.54 in².)

18. Se hace un agujero circular de 10 cm de diámetro en una hoja de aluminio a 10°C . Encontrar el diámetro del agujero cuando la temperatura sube a 280°C .

CAPACIDAD TERMICA Y TRANSMISION DEL CALOR

Conforme a la teoría cinética de la materia, los diferentes átomos de que están constituidas todas las sustancias, se encuentran en rápido movimiento. Cuando un cuerpo se calienta a más alta temperatura, ese movimiento atómico aumenta y el cuerpo se dilata. Cuando el cuerpo se enfría, el movimiento atómico disminuye y el cuerpo se contrae. El Conde de Rumford,* a fines del siglo XVIII, fue el primero en proponer la teoría de que el calor es una forma de energía y es debido a la energía cinética del movimiento molecular.

No siempre está claro para un estudiante novel que la temperatura y la cantidad de calor, son cantidades diferentes. Se puede ilustrar la diferencia entre las dos calentando dos recipientes con agua. Se tendrá que quemar mayor cantidad de combustible para calentar un recipiente grande de agua que para uno pequeño. Aunque los dos empiecen a la misma temperatura y los dos se eleven a una temperatura igual de ebullición, 100° C, el recipiente mayor habrá necesitado mayor energía calorífica, o sea, mayor cantidad de calor.

* Benjamín Thompson nació en Rumford, Nueva Hampshire, E. U. A., en 1753. Pasó la mayor parte de su vida adulta en Alemania, donde, entre otras cosas, administró una fábrica de armas. Por sus observaciones sobre el calor producido al taladrar los cañones, pudo demostrar que el calor no es un fluido penetrante, sino una forma de energía interna de los átomos o las moléculas que forman las sustancias. Su expresión fue que el calor era una forma de movimiento de estas partículas. Por estos y otros servicios, el emperador le confirió un título de nobleza, y Thompson escogió el nombre de su lugar de nacimiento, Rumford (ahora Concord, New Hampshire) para su título.

16.1 La caloría. La diferencia entre la temperatura y la cantidad de calor se ilustra muy bien por el siguiente experimento (ver la fig. 16A). Cinco esferas, todas del mismo tamaño, pero de diferentes materiales, se calientan en agua hirviendo a la temperatura de 100° C. En determina-

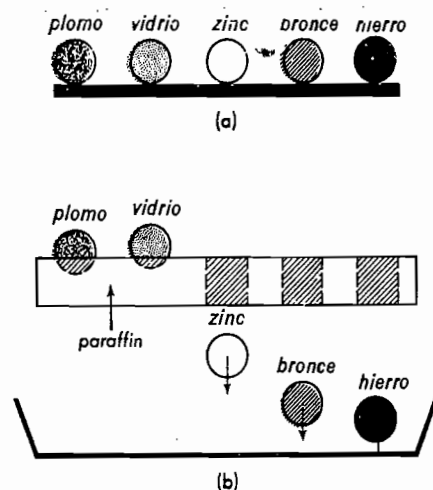


Fig. 16A. Experimento que muestra la diferencia de las capacidades térmicas de distintas sustancias de igual tamaño.

do momento, se las coloca sobre una placa de parafina de unos 0.5 cm de espesor, y se deja que se abran camino derretiendo la parafina. Las esferas de hierro y bronce caen pronto a través de la parafina, pero las esferas de plomo y de vidrio nunca llegan a atravesarla. Esto ilustra el hecho de que el contenido de calor de las bolas de hierro o del bronce, aunque estén a la

misma temperatura que las otras, es considerablemente mayor que el contenido de calor de las de vidrio o plomo.

A fin de determinar la capacidad térmica exacta de una sustancia, deberemos primero definir las unidades de calor: la *caloría* y el *Btu*. La cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 1 gramo de agua, 1° C, se llama *caloría* (abreviatura, *cal*). La cantidad de calor necesaria para elevar 1° F la temperatura de 1 lb de agua se llama *Btu* (unidad térmica británica). La relación entre estas dos unidades se puede calcular rápidamente, y es

$$1 \text{ Btu} = 252 \text{ cal} \quad (16a)$$

Una vez que se ha definido la caloría, puede calcularse la cantidad de calor necesaria para llevar una cantidad dada de agua desde una temperatura hasta otra, por la simple multiplicación de la masa del agua y la diferencia de temperaturas. Por ejemplo, para elevar 25 g de agua de 10° C a 50° C, se requieren $25 \times 40 = 1000 \text{ cal}$, o para elevar 6 lb de agua de 32° F a 60° F se requieren $6 \times 28 = 168 \text{ Btu}$.

Aunque una caloría pueda elevar 1 grado centígrado a 1 gramo de agua, se necesitará un número diferente de calorías para elevar un grado centígrado la temperatura de 1 gramo de otras sustancias. Por ejemplo, para elevar 1 grado centígrado la temperatura de 1 gramo de hierro, se requiere sólo una décima parte de caloría, y para elevar un grado centígrado la temperatura de 1 gramo de plomo, se requiere sólo una treintava parte de caloría. En otras palabras, tiene diferente valor la capacidad térmica de masas iguales de materiales diferentes.

La *capacidad térmica de una sustancia se define como el número de calorías necesarias para elevar 1° C la temperatura de 1 gramo de la sustancia. La relación entre la capacidad térmica de una sustancia y la capacidad térmica del agua, se llama calor específico. Numéricamente, el calor específico tiene el mismo valor que*

la *capacidad térmica* y, siendo una proporción, como en el caso de la *densidad*, no tiene dimensiones.

En la Tabla 16A se dan los calores específicos o capacidades térmicas de unas cuantas sustancias conocidas.

TABLA 16A. CALORES ESPECÍFICOS

Sustancia	c	Sustancia	c
Aluminio ..	0.220	Mercurio ..	0.033
Bronce	0.092	Oro	0.031
Cobre	0.093	Plata	0.056
Glicerina ..	0.60	Plomo	0.031
Hielo	0.50	Vidrio	0.160
Hierro	0.105	Zinc	0.092

Para mostrar el uso de esta tabla, considérese el cálculo del contenido de calor de las esferas usadas en el experimento anterior. Las masas medidas de cada esfera, están dadas en la segunda columna de la tabla siguiente (tabla 16B) y las correspondientes capacidades térmicas en la siguiente columna. Los productos de estas dos cantidades dan los valores indicados en la cuarta columna que representan las cantidades de calor necesarias para elevar 1° C cada esfera. Ya que todas las esferas

TABLA 16B. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO DE LAS ESFERAS

Esfera	m (g)	c	H para 1° C	H para 80° C
Plomo	45	0.031	1.39	111
Vidrio	10	0.160	1.60	128
Zinc	24	0.092	2.20	176
Bronce	30	0.092	2.76	221
Hierro	28	0.105	2.94	235

fueron llevadas desde la temperatura ambiente de 20° C a la temperatura de ebullición del agua, 100° C, el valor de la cuarta columna tiene que ser multiplicado

por el cambio de temperatura, 80° C, para obtener el valor total del calor que da la quinta columna.

Estos números indican claramente que, en este experimento, el hierro y el bronce deben pasar primero derritiendo la parafina: tienen mayores cantidades de energía calorífica almacenada, 235 y 221 calorías respectivamente.

La definición de la capacidad térmica y el cálculo del contenido total de calor, pueden compendiarse en una fórmula de uso general de la siguiente forma:

$$H = mc(t_2 - t_1) \quad (16b)$$

H representa la cantidad total de calor en calorías, o Btu; m la masa del cuerpo a que se le está dando el calor; c la capacidad térmica, y $t_2 - t_1$ la elevación de temperatura.

16.2 Cambio de estado. La continua adición de calor a una masa sólida o líquida puede llevarla a un cambio de estado. El comportamiento general de muchas sustancias puede ser ilustrado por una descripción detallada de los cambios que ocurren al más corriente de los líquidos, el agua. Si un trozo de hielo a la temperatura de -10° C se coloca en un vaso y se pone en una estufa para calentarlo, su temperatura subirá lentamente hasta llegar a 0° C.

A 0° C la temperatura deja de subir y el hielo empieza a derretirse. El hielo se derrite cada vez más al seguir calentando, pero la temperatura no vuelve a subir, hasta que todo el hielo se ha convertido en líquido. Entonces el agua se calienta más y más y llega a la temperatura de 100° C, donde se produce una vigorosa ebullición. Aquí vuelve a detenerse la elevación de temperatura y, al agregarse calor, se convierte en vapor más agua. Por último, cuando toda el agua se ha transformado en vapor a 100° C, empieza a subir nuevamente la temperatura.

Todos estos cambios de estado, están representados en la gráfica de la fig. 16B. Los tramos horizontales representan los cambios de estado donde no hay variación de temperatura, mientras que las secciones

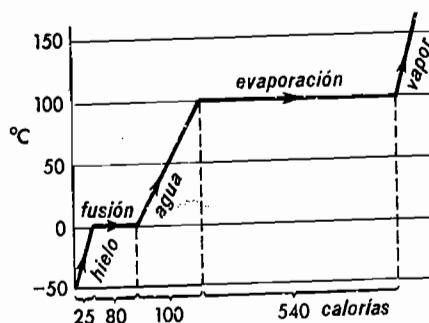


Fig. 16B. Gráfica de calor-temperatura de un gramo de hielo, partiendo -50° C, ilustrando los calores de fusión y de evaporación.

inclinadas representan las variaciones de temperatura sin cambios bruscos de estado.

16.3 Transmisión del calor. Hay muchos métodos para transmitir calor de un lugar a otro. Algunos de estos métodos son lentos e indirectos mientras que otros son muy rápidos y directos. Un estudio cuidadoso de todos los métodos conocidos ha llevado a confirmar que hay sólo tres modos de transmitir el calor. Estos son: *conducción*, *convección* y *radiación*. La conducción es un proceso lento por el cual se transmite calor a través de una sustancia por actividad molecular. La convección es un proceso más rápido en que interviene el propio movimiento de un sitio a otro de la materia calentada. La radiación de calor entre dos lugares, se realiza en la misma forma y con la misma rapidez con que se propaga la luz, 300 000 km/seg.

16.4 Conducción. No todos los cuerpos son buenos conductores del calor. Los metales como el cobre y la plata son mucho mejores al respecto que otras sustancias, como la madera, el vidrio, el papel o el agua. La capacidad de una sustancia de

terminada para conducir el calor, se mide por la llamada *conductividad térmica*.

Las conductividades relativas de diferentes sustancias, se pueden demostrar con un experimento que se efectúa como sigue: se cubren con una pintura especial amarilla seis varillas semejantes de diferentes metales: cobre, aluminio, bronce, estaño, plata alemana y plomo, y se montan como se ve en la fig. 16C. Los extremos infe-

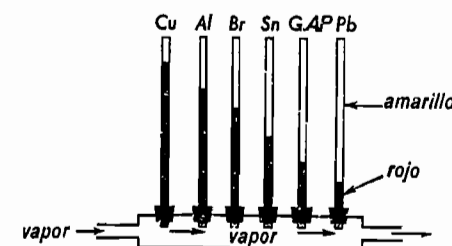


Fig. 16C. Conductividad térmica de seis metales diferentes: cobre, aluminio, bronce, estaño, plata alemana y plomo.

riores de las varillas se encajan en tapones de goma que entran en los agujeros perforados en un tubo metálico, donde dichos extremos son calentados hasta 100° C con el vapor de agua que circula por el tubo. Conforme el calor sube lentamente por cada varilla, la pintura amarilla se vuelve roja. Después de 5 ó 10 minutos de estar pasando vapor, las alturas a que se ha cambiado el color de la pintura, son aproximadamente las que se indican en el dibujo con las áreas oscurecidas. Se observa que el cobre es el mejor conductor y el plomo el peor entre estos seis metales.

A fin de calentar un objeto, se acostumbra a ponerlo en contacto con otro cuerpo que está a temperatura más alta. Un recipiente con agua, por ejemplo, se calienta, generalmente, poniéndolo sobre una llama. La combustión del gas imprime un estado de rápido movimiento a las moléculas del mismo. Dichas moléculas chocan en el fondo del recipiente y hacen que las del metal de éste aumenten sus vibraciones. Estas últimas, a su vez,

golpean a otras moléculas metálicas, transmitiendo el movimiento hasta el interior del recipiente. Esto se llama *conducción* de calor. Las moléculas del metal hacen que la primera capa de moléculas de agua se muevan más rápidamente y éstas, a su vez, aumentan progresivamente el movimiento de las demás. Así es como el movimiento molecular, llamado calor, se lleva a la masa del agua.

Experimentalmente se demuestra que la cantidad de calor que fluye a lo largo de una varilla es proporcional al tiempo, al área transversal de la varilla y a la diferencia de temperaturas entre sus extremos, e inversamente proporcional a su longitud.

Usando símbolos apropiados para cada uno de estos factores y añadiendo una constante de proporcionalidad, se obtiene la siguiente ecuación:

$$H = k \frac{A(t_2 - t_1)}{L} T \quad (16c)$$

H es la cantidad de calor que fluye a través del cuerpo de longitud L y sección transversal A ; k la conductividad térmica; T la duración del flujo calorífico; t_2 la temperatura del extremo caliente, y t_1 la temperatura del extremo frío. Se ve muy claramente que, si son aumentadas la diferencia de temperaturas $t_2 - t_1$ o el área A (ver la fig. 16D), se aumenta la can-

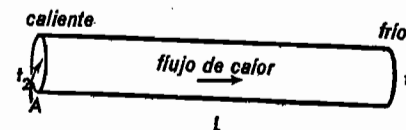


Fig. 16D. Factores medibles que determinan la cantidad de calor que fluye por conducción a través de un objeto.

tidad de calor que pasa por la varilla. No es tan evidente, en cambio, que el aumento de longitud L haga disminuir el flujo de calor, o que una disminución de longitud produzca un aumento de dicho flu-

jo. Esto último se ilustrará con dos experimentos.

Aunque el papel es un mal conductor, el flujo de calor a través de él se puede hacer muy grande, aumentando A , el área transversal, y disminuyendo L , la distancia que debe recorrer el calor. El diagrama (a) de la fig. 16E, muestra la conducti-

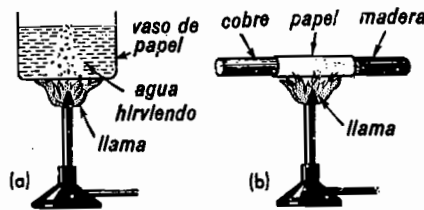


Fig. 16E. Conducción de calor a través del papel.

vidad térmica, haciendo hervir agua dentro de un vaso de papel. Aunque la flama del gas da directamente en la superficie del papel, el vaso no se quema. La razón de esto es que el calor que recibe la superficie inferior del papel, se transmite a través de él hasta el agua, con suficiente rapidez para que la temperatura del papel siga quedando por debajo de su temperatura de combustión. Si el papel es grueso, se quemará su superficie inferior. Aunque parezca extraño, cuanto más delgado es el papel, menor es el riesgo de que arda.

En el diagrama (b) de la fig. 16E se enrolla una capa de papel delgado alrededor de una varilla, que es la mitad de madera y la mitad de cobre. Cuando se acerca la llama, como se ilustra en la figura, el papel se quema sólo en la parte que está en contacto con la madera, y no arde en absoluto, en donde está en contacto con el cobre. Siendo el cobre un buen conductor, transmite el calor al interior del metal y lo aleja de la superficie de éste. Al contrario, siendo la madera un mal conductor, no puede transmitir el calor alejándolo de la superficie con rapidez suficiente, y el papel se calienta y pronto se quema.

Las conductividades térmicas de algunas sustancias se dan en la tabla 16C.

TABLA 16C. CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS k , EN CAL/SEG. CM °C

Sustancia	k	Sustancia	k
Agua	0.0014	Madera ...	0.0005
Aluminio ..	0.50	Mercurio ..	0.02
Azulejo ...	0.0020	Papel	0.0003
Bronce	0.26	Plata	0.97
Cobre	0.92	" alemana ..	0.08
Cuero	0.0004	Plomo	0.08
Hierro	0.16	Vidrio	0.0025

El número k es la cantidad de calor, medida en calorías, que pasa en un segundo a través de un cubo de un centímetro de lado cuando sus dos caras opuestas se mantienen a una diferencia de temperatura de 1° C. Conociendo el valor de k para cierta sustancia, se puede calcular mediante la ecuación (16c), la cantidad de calor que fluye a través de un objeto de dicho material de cualquier medida.

Ejemplo. Un extremo de una varilla de aluminio de 40 cm de largo y 5 cm² de sección transversal se mantiene a una temperatura de 100° C y el otro extremo a 20° C. Encontrar la cantidad de calor que fluye a través de la varilla en 2 min.

Solución. Sustituyendo en la ec. (16c), obtenemos

$$H = 0.50 \frac{5(100 - 20)}{40} 120 = 600 \text{ cal.}$$

16.5 Convección. ¿Por qué una sustancia tan mala conductora del calor como el agua, se puede calentar tan rápidamente cuando se coloca en un recipiente sobre una llama? Ello se debe a la segunda forma de transmisión del calor, conocida como convección. El agua del fondo del recipiente se calienta primero. Debido a su elevación de temperatura, se dilata. Siendo más ligera el agua caliente que la fría que está sobre ella, subirá a la parte superior permitiendo que el agua fría baje al fondo por los lados del vaso. Esta acción produce un flujo de agua llamado *corriente de convección* que mantiene el agua en

agitación hasta que se calienta toda (ver la fig. 16F).

En la fig. 16G se ven las corrientes de convección producidas por el calentamiento de un recipiente con agua. Se llena

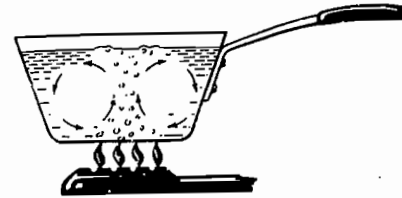


Fig. 16F. Corrientes de convección al calentar agua sobre una estufa.

con agua un tubo de vidrio en forma de O y luego se calienta en una de las esquinas inferiores, como se indica en la figura. Si se agrega una gota de tinta en la abertura superior, se mezcla ésta con el agua y rápidamente fluye alrededor del tubo,

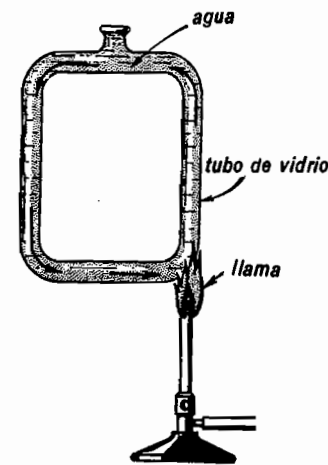


Fig. 16G. Convección de calor por circulación de agua por una tubería.

en un sentido contrario al avance de las manecillas del reloj. Esta circulación es la base de los sistemas de calefacción con agua caliente usados en algunas casas. Como se ilustra en la fig. 16H, el agua caliente de un depósito de abastecimiento que está en un cuarto inferior o en el sótano,

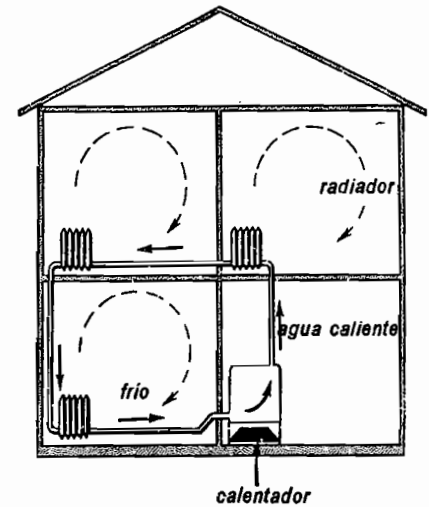


Fig. 16H. Corrientes de convección de agua en las tuberías, y de aire en los cuartos.

tano, sube y fluye a través de varios radiadores para regresar de nuevo al depósito, donde vuelve a recalentarse.

Muy semejante es la acción de los sistemas de calefacción con aire caliente usados en otras casas. El aire se calienta en un horno que está en el sótano y sube por una salida que está en el suelo o cerca de él, como se ve en la fig. 16I. Ascende por un lado del cuarto hasta el techo, recorre éste y baja después por el otro lado y, pasando a través del piso por otra abertura, regresa al horno.

En la atmósfera, las corrientes de convección son considerables y originan el viento. En las costas, el aire fresco del océano viene hacia la tierra como brisa marina, debido a la convección. Los rayos del Sol son absorbidos más rápidamente por la tierra que por el agua, y el aire calentado por la tierra sube, mientras que el aire más frío del océano llega a ocupar su lugar. En la noche, la tierra se enfría rápidamente por la radiación hacia el cielo frío, y pronto el aire de encima del agua se encuentra más caliente y sube provocando un movimiento de regreso del aire y entonces el viento sopla de la tierra hacia el mar. Estas corrientes de aire son

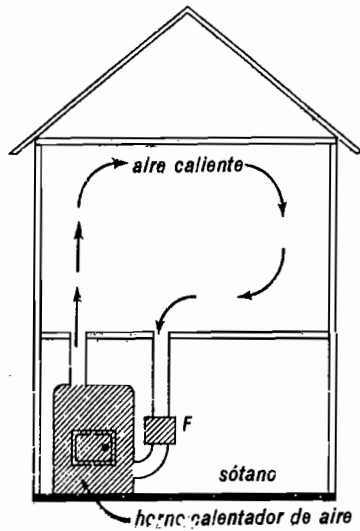


Fig. 16I. Corrientes de convección de aire caliente producidas por calefacción.

fácilmente observables siguiendo el humo de una fogata hecha en la playa. Durante el día, el humo sopla hacia la tierra y en la noche sopla hacia el mar.

Los aviadores están bien informados de las corrientes ascendentes del aire sobre ciertas zonas del suelo. Siendo la radiación solar mejor absorbida por un terreno recientemente arado, por ejemplo, el aire se calienta lo suficiente para producir corrientes de convección. Al volar un aeroplano sobre estas corrientes ascendentes de aire, recibe un brusco levantamiento. Durante ciertas estaciones del año, estas corrientes ascendentes de aire caliente son enfriadas por las capas de aire que están sobre de ellas, condensándose su vapor en forma de nubes.

16.6 Radiación. Cuando el Sol sale por el horizonte en la mañana, se puede percibir el calor tan pronto como se hace visible. Este calor, llamado *calor radiante*, viaja a la velocidad de la luz, o sea, 300 000 km/seg.

El calor radiante simplemente es una de las muchas formas de energía y es fácilmente localizada por medio de un radió-

metro, termopar, termistor, termómetro, etcétera. Un radiómetro de Crooke, mostrado en la fig. 16J, se encuentra con frecuencia en los aparadores de joyerías o ferreterías. Bajo la luz del día o una lámpara brillante, se pondrá a girar la veleta con aletas de mica muy delgada como si estuviera en movimiento perpetuo.

Cada aleta del radiómetro tiene una cara brillante y negra por la otra. La cara negra absorbe mejor el calor radiante que la cara brillante y calienta el aire adyacente. El rápido impacto de las moléculas de aire calentado ejerce entonces una fuerza mayor sobre la cara negra empujándola y haciéndola girar.

Si el radiómetro estuviera en un vacío tan perfecto que hubiese poco aire residual dentro del bulbo, las ondas de luz al reflejarse en la cara brillante ejercerían

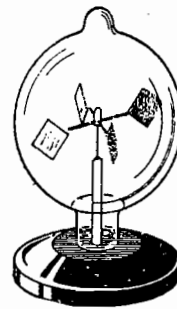


Fig. 16J. Un radiómetro de Crooke.

dos veces más fuerza que las absorbidas por la cara negra y entonces la veleta giraría en dirección contraria.

El calor radiante, u ondas caloríficas, son ondas electromagnéticas que tienen todas las propiedades generales conocidas de la luz visible. La diferencia esencial entre las dos es que los rayos de calor, a veces llamados rayos infrarrojos, tienen una longitud de onda un poco mayor y no son visibles al ojo humano.

Una demostración de la reflexión de los rayos infrarrojos se ilustra en la fig. 16K. Una bujía (o vela) que actúa como fuente en *F*, emite rayos de luz y de calor

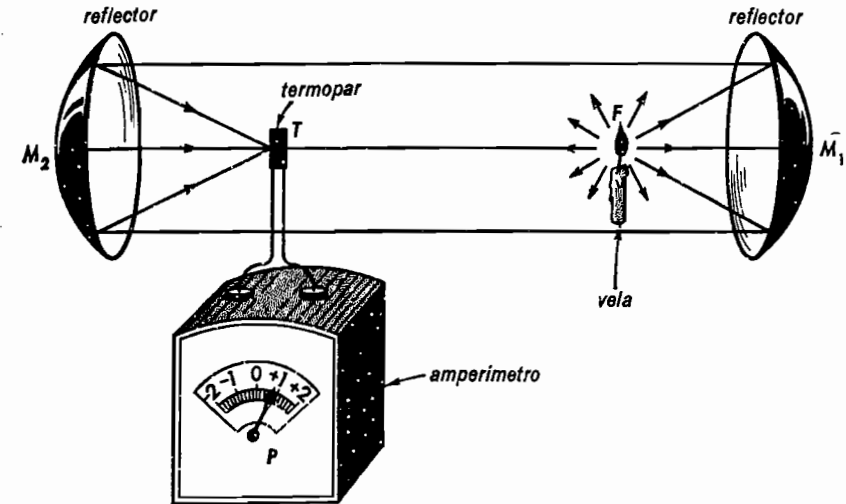


Fig. 16K. Reflexión de los rayos de calor en espejos cóncavos.

en todas direcciones. De estos rayos, los que llegan al espejo cóncavo *M*₁, se reflejan en un haz paralelo que al llegar al segundo espejo *M*₂, vuelven a ser reflejados, reuniéndose en un foco sobre las uniones expuestas de la termopila *T*. Conforme se calientan las uniones de la termopila, se produce una corriente eléctrica, que hace que la aguja *P* del amperímetro se mueva a la derecha. Cuando se quita la vela, la aguja regresa al cero.

En todas las casas donde se tiene una chimenea como medio de calefacción, hay

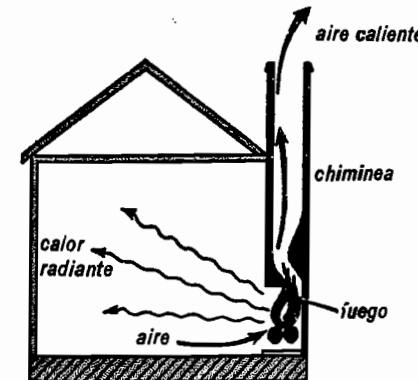


Fig. 16L. El hogar calienta por la radiación de las llamas, del carbón y de las paredes. Las corrientes de convección forman un tiro que saca el aire caliente y el humo por la chimenea.

un ejemplo práctico de la radiación del calor. El calor que recibe la habitación desde la chimenea, llega casi todo en forma de rayos infrarrojos que se originan en las llamas, las brasas y en las paredes

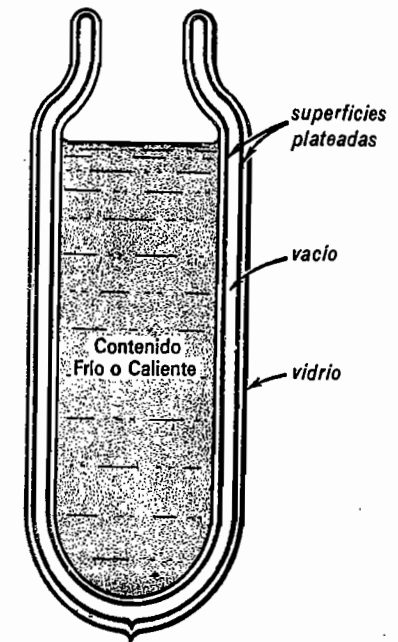


Fig. 16M. El frasco de Dewar o termos reduce al mínimo la conducción por ser de vidrio, la convección por el vacío y la radiación por el plateado.

calientes de piedra y ladrillo. El aire que se calienta en el hogar no circula en la habitación sino que sale por la chimenea en una corriente de convección. Ver la fig. 16L. Esta corriente de aire ascendente, hace entrar aire fresco al local proporcionando al fuego el oxígeno necesario para quemar la leña o el carbón.

Un frasco de Dewar, o *termo*, es un práctico aparato en que se han reducido al mínimo la conducción, la convección y la radiación del calor. Como se ve en la sección transversal de la fig. 16M, un termo consiste en un recipiente de vidrio de

doble pared, plateado por la cara interior. El propósito del plateado es reflejar todo el calor radiante que trata de entrar o salir del frasco. Al espacio que queda entre las dobles paredes se le hace un alto vacío, para evitar las corrientes de convección, y siendo mal conductor el vidrio, se hace mínima la conducción a través de las paredes del cuello de la botella. Con la excepción del espacio vacío entre las paredes, los calorímetros usados comúnmente en los laboratorios son muy semejantes al frasco de Dewar.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente lo siguiente: *a)* unidad térmica británica; *b)* caloría; *c)* capacidad térmica, y *d)* calor específico.

2. ¿Qué se entiende por transmisión del calor? ¿Cuáles son las formas de transmitir el calor?

3. Nombrar tres sustancias buenas conductoras del calor. Nombrar tres sustancias malas conductoras del calor.

4. ¿Cuál es el proceso por el cual se conduce el calor a través de un sólido? ¿Es éste un método rápido de transmitir calor?

5. Describir brevemente un experimento realizable para ilustrar la diferencia en conductividad térmica entre diversos metales.

6. ¿De qué factores depende la cantidad de calor conducida a través de una varilla? Escribir la fórmula.

7. ¿Qué es la convección? ¿Es la convección más rápida que la conducción como método para transmitir calor? ¿Por qué?

8. Hacer el diagrama de un experimento que ilustre las corrientes de convección en un líquido.

9. ¿Qué determina las corrientes de convección en el aire o en el agua al calentarlos?

10. Aunque el agua es mala conductora del calor, una vasija con agua se calienta

rápidamente sobre una parrilla o mechero. ¿Por qué? ¿Interviene la conducción? ¿Interviene la convección?

11. Hacer un diagrama y explicar brevemente el proceso de calentamiento por medio de una chimenea.

12. Hacer un diagrama de un frasco de Dewar o *termo* y explicar por qué puede conservar calientes los líquidos por un tiempo largo.

13. Encontrar el número de calorías que se necesitan para elevar la temperatura de 20 kg de hierro de 20° C a 1 220° C. (*Resp.* 2.52×10^6 cal.)

14. ¿Cuántos Btu se necesitan para llevar la temperatura de 20 lb de cobre de 40° F a 480° F?

15. ¿Cuánto calor se necesita para elevar la temperatura de 25 lb de plomo de 50° F a 500° F? (*Resp.* 349 Btu.)

16. Calcular la cantidad de calor necesaria para subir la temperatura de 6 kg de aluminio de 20° C a 550° C.

17. ¿Cuántas calorías se necesitan para elevar 20 kg de hielo de 0° C a agua a la temperatura de ebullición? (*Resp.* 3.60×10^6 cal.)

18. ¿Cuánto calor se necesita para cambiar 30 kg de agua a 20° C en vapor a 100° C?

19. Calcular la cantidad de calor necesaria para convertir 5 kg de hielo a -40° C en vapor a 100° C. (Anotar de la Tabla 16A el calor específico del hielo de 0.5.) (*Resp.* 3.70×10^6 cal.)

20. Un extremo de una varilla de cobre de 30 cm de largo y un área transversal de 2 cm² se mantiene a 12° C y el otro a 85° centígrados. ¿Cuánto calor fluirá a lo largo de la varilla en 3 min?

21. Una varilla de bronce mide 25 cm de largo y tiene un área transversal de 4 cm². ¿Cuánto calor fluirá por la varilla en 5 min si un extremo se mantiene a 10° C y el otro a 95° C? (*Resp.* 1 061 cal.)

22. El mango de madera de una sartén tiene 4.0 cm de diámetro y 20 cm de largo. Si la temperatura de la sartén es de 360° C y el extremo libre del mango se mantiene a 35° C, ¿cuánto calor fluirá por el mango en 10 min?

23. El fondo de una olla de cobre es de 0.20 cm de grueso y tiene un área de 500 cm². Si la superficie superior está a 90° C y la inferior a 95° C por el calentamiento

de la llama, ¿cuánto calor fluirá a través del fondo en 15 min? (*Resp.* 1.035×10^6 calorías.)

24. Una varilla de bronce es de 25 cm de largo y 4 cm de diámetro. ¿Cuánto calor fluirá por esta varilla en 5 min si un extremo se mantiene a 10° C y el otro a 80° C?

25. Un extremo de una varilla de aluminio de 20 cm de largo y área transversal de 4 cm² se mantiene a 15° C y el otro extremo a 185° C. ¿Cuánto calor fluirá por la varilla en 5 min? (*Resp.* 5 100 cal.)

26. Una barra de hierro con sección transversal cuadrada de 1.5 cm por lado tiene una longitud de 25 cm. ¿Cuánto fluirá por la barra en 10 min si un extremo se mantiene a 280° C y el otro a 50° C?

27. La suela de un zapato tiene 6 mm de grueso y tiene un área de 230 cm². ¿Cuánto calor fluirá por las suelas en una hora si la persona que usa el par de zapatos está parada sobre la nieve? Tomar la temperatura del cuerpo humano como 37° C y la de la nieve como -10° C. (*Resp.* 25 900 calorías.)

CAMBIOS DE ESTADO Y BAJAS TEMPERATURAS

17.1 Dilatación y contracción en la fusión. Cuando los metales fundidos se vacían en un molde para hacer piezas coladas, el metal se puede contraer o dilatar al solidificarse, y después, cuando se enfría a la temperatura ambiente, contraerse o dilatarse, de acuerdo con su coeficiente de dilatación térmica. El hierro colado, por ejemplo, es una sustancia, que, al solidificarse, se dilata ligeramente, pero después, al enfriarse a la temperatura ambiente, se contrae cerca de 1% de su longitud. Por ello, es apropiado para el moldeo, ya que la ligera dilatación al solidificarse, ayuda a que reproduzca todos los detalles del molde. Para dar margen al acortamiento producido al enfriarse, los modelos con los que se forman los moldes deben hacerse un 1% mayores que las medidas definitivas que deberá tener la pieza de hierro.

La fig. 17A presenta un experimento que ilustra la enorme fuerza de dilatación del agua al congelarse. Una pequeña esfera de hierro colado de unos 5 cm de diámetro y 3 mm de grueso, se llena com-

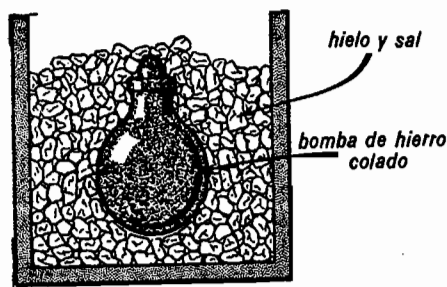


Fig. 17A. Al congelarse el agua dentro de la bomba, la dilatación revienta las paredes de hierro colado.

pletamente con agua a una temperatura cercana a 0° C. Después de atornillar fuertemente el tapón de hierro, se la coloca en una mezcla frigorífica de hielo picado y sal. Después de algunos minutos, se congela el agua y hace estallar la bomba con un golpe sordo.

17.2 Enfriamiento por evaporación. Al dejar agua en un vaso abierto, se evapora lentamente, es decir, va pasando espontáneamente al estado gaseoso. Por esto se considera que la evaporación es una dilatación libre, y esta última siempre aparece acompañada de enfriamiento. Este fenómeno de enfriamiento por evaporación, que es tan importante por sus muchas aplicaciones comerciales, se puede explicar por la teoría cinética de la materia.

Debido a los movimientos irregulares de las moléculas de un líquido, algunas de ellas obtienen momentáneamente una velocidad muy grande.

Si una molécula superficial logra una gran velocidad hacia arriba, puede escaparse al aire por encima del líquido. Algunas de estas moléculas que se escapan, regresan otra vez al líquido por los cho-

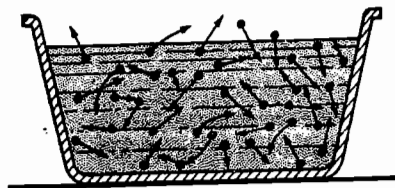


Fig. 17B. La evaporación del agua de un vaso abierto se debe al movimiento rápido de las moléculas de agua y su ocasional escape al aire.

ques fortuitos con las moléculas de aire que están por encima de la superficie, pero muchas de ellas no regresan (ver la figura 17B). Puede acelerarse el escape accidental de las moléculas haciendo circular aire sobre la superficie del líquido. El aire se lleva las moléculas recién evaporadas antes de que tengan oportunidad de regresar.

En virtud de la gran velocidad de las moléculas que escapan de la superficie de un líquido, se pierde con ellas una cantidad de energía cinética considerablemente mayor que la promedia. La disminución de la energía cinética media de las moléculas restantes en el líquido significa un descenso de la temperatura. Cuanto más rápida es la evaporación, más rápido será el enfriamiento. Esto se demuestra palpablemente vaciando una pequeña cantidad de éter o alcohol. Cualquiera de estos líquidos, y en especial el éter, se evapora muy rápidamente, enfriando la su-

perficie del dedo. Los cirujanos, basándose en esto, usan con frecuencia el éter en lugar de anestésico, para congelar porciones limitadas del cuerpo antes de iniciar alguna pequeña operación.

El enfriamiento por evaporación se puede demostrar ante un auditorio vaciando una pequeña cantidad de éter sobre el bulbo de un termómetro de aire, como se ilustra en la fig. 17C. Debido al enfriamiento del bulbo de vidrio, el aire interior se contrae levantando más agua por el tubo del termómetro.

17.3 Humedad. Cuando las moléculas de agua se escapan de la superficie libre del líquido por evaporación, se mezclan con las moléculas del aire que está encima. Si el espacio que está sobre la superficie del líquido se encuentra cerrado, como se ve en la fig. 17D, esta mezcla no puede

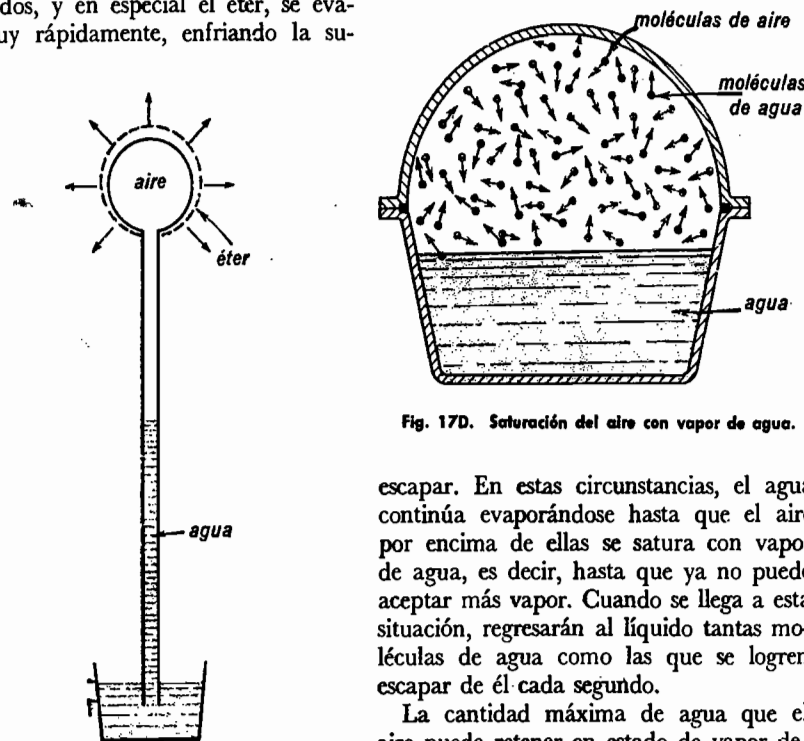


Fig. 17D. Saturación del aire con vapor de agua.

escapar. En estas circunstancias, el agua continúa evaporándose hasta que el aire por encima de ellas se satura con vapor de agua, es decir, hasta que ya no puede aceptar más vapor. Cuando se llega a esta situación, regresarán al líquido tantas moléculas de agua como las que se logren escapar de él cada segundo.

La cantidad máxima de agua que el aire puede retener en estado de vapor depende de la temperatura, y en parte también de la presión del aire. Esto se ilustra

Fig. 17C. Enfriamiento producido por la evaporación del éter.

por los valores dados en la tabla 17A. La temperatura del aire está dada en una columna, y en la otra se da la cantidad máxima de vapor de agua que puede existir en un metro cúbico de aire, a dicha temperatura.

TABLA 17A. MASA DE VAPOR DE AGUA EN UN METRO CÚBICO DE AIRE SATURADO

Temperatura	Agua de vapor
0° C " 32° F	4.8 g
5° C " 41° F	6.8 g
10° C " 50° F	9.3 g
15° C " 59° F	12.7 g
20° C " 68° F	17.1 g
25° C " 77° C	22.8 g
30° C " 86° F	30.0 g
35° C " 95° F	39.2 g

Por la tabla se ve claramente que cuanto más caliente está el aire, mayor es la cantidad de vapor de agua que puede retener.

La atmósfera que podemos considerar como aire libre, no está siempre saturada con vapor de agua. Decimos que el aire está seco si contiene muy poco o ningún vapor de agua. Si contiene mucho vapor, decimos que está húmedo.

La cantidad de vapor de agua presente en un metro cúbico de aire, se llama *humedad absoluta*. Se mide por el número de gramos de vapor de agua presentes en un metro cúbico de aire. Por ejemplo, la humedad absoluta puede decirse que es de 14 g/m³.

Al hablar de la humedad del aire, se acostumbra más frecuentemente expresarla en *humedad relativa* en vez de humedad absoluta. La humedad relativa se define como la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en un volumen dado de aire y la cantidad requerida de vapor para saturar dicho volumen de aire a la misma temperatura. Supongamos, para ilustrarlo, que el aire contiene en este momento 5.7 g/m³ de vapor de agua y la temperatura es 25° C. Si el aire estuviera saturado a esta temperatura (ver la Ta-

bla 17A), contendría 22.8 g/m³. Por lo tanto,

$$\text{humedad relativa} = 5.7/22.8 = 0.25$$

Se acostumbra expresar esta respuesta en tantos por ciento y decir que la humedad relativa en este caso es de 25%.

Si se baja la temperatura del aire que está saturado con vapor de agua, puede condensarse algo de dicho vapor al estado líquido. Estas son las condiciones en que se forma la lluvia y la neblina. La razón de esta condensación es que a más baja temperatura debe existir menos vapor de agua para seguir saturado el aire. Si el aire se enfría sin la formación de lluvia o niebla, se encontrará en un estado inestable de sobresaturación.

17.4. Tensión del vapor. La presencia del vapor de agua en el aire aumenta la presión atmosférica. Para explicar por qué ocurre esto, considérese de nuevo la figura 17D. Conforme se evapora más agua al aire de encima, se hace mayor cada vez la presión, debido al bombardeo de las paredes por las moléculas de agua, llegando al máximo en la saturación. Las moléculas de agua ejercen presión y también las moléculas de aire la ejercen, independientemente unas de las otras.

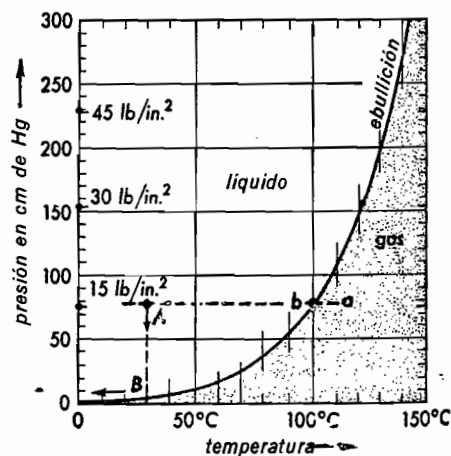


Fig. 17E. Curva de temperaturas de ebullición de agua a diferentes presiones.

La tensión (presión) del vapor se expresa generalmente en centímetros de mercurio, y al llegar a la saturación se llama tensión del vapor saturado. La fig. 17E es una gráfica de las tensiones del vapor saturado. Esta gráfica indica que a altas presiones el aire se satura a más alta temperatura.

17.5 Ebullición. La ebullición de un líquido no es más que un caso de evaporación rápida. Conforme se eleva la temperatura del agua, se aumenta la rapidez de la evaporación hasta que al llegar a la temperatura de ebullición, llega a un máximo. Más allá de esta temperatura, el agua sólo puede existir en el estado de vapor.

Cuando hierve el agua a la presión atmosférica normal, se produce la evaporación en todo el líquido al mismo tiempo que en la superficie. Son prueba de ello las burbujas de vapor saturado que se forman cerca del fondo y que aumentan de tamaño conforme van subiendo hasta la superficie. Las burbujas se pueden formar gracias a que la presión de vapor a 100° C es de 76 cm de mercurio y es igual a la presión exterior de la atmósfera. A menos que la tensión del vapor sea igual o ligeramente mayor que la presión que hay en un punto del líquido, no puede haber ebullición en dicho punto.

Si en el proceso de ebullición del agua, se aumenta la presión ejercida sobre el líquido mientras se están formando burbujas dentro de él, las burbujas dejarán de formarse y el líquido dejará de hervir. Se puede iniciar nuevamente la ebullición a esta presión mayor agregando más calor y elevando la temperatura a un valor más alto. En otras palabras, *cuanto más alta es la presión a que está un líquido, más alta será su temperatura de ebullición*. Recíprocamente, *cuanto más baja es la presión a que está sometido un líquido, más baja es la temperatura requerida para hacerlo hervir*.

En la fig. 17E se tiene una gráfica de los puntos de ebullición del agua conforme

varía la presión. Nótese que a la presión atmosférica normal de 76 cm de Hg, que vale 1 013 000 dinas/cm² (15 lb/in²), el agua hierve a 100° C. A una presión doble, se debe llegar a una temperatura de 120° C, etc.

Consideremos, por ejemplo, el agua hirviendo dentro de una olla a presión cuando el medidor de seguridad marca 15 lb/in². (Usamos aquí unidades inglesas por ser tan común su uso en las ollas de presión que se encuentran en el mercado, 15 lb/in² es aproximadamente el valor de una atmósfera normal. Ver la fig. 17F.) Conforme

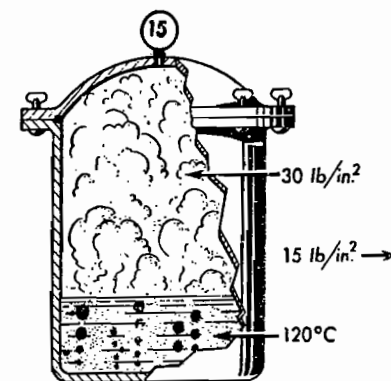


Fig. 17F. En una olla de presión que marca 15 lb/in², el agua hierve a 120° C.

se va calentando más el agua dentro de la olla, se evapora algo de ella, y aumenta la presión. Esta presión continua subiendo hasta que llega a 15 lb/in² encima de la presión exterior. En este punto, la válvula de seguridad se abre ligeramente y evita que la presión interior supere este valor. En estas condiciones, la presión fuera de la olla, es 1 atm., mientras que la presión dentro de ella de 1 atm. más, o sea, 30 lb/in². En la gráfica vemos que ahora el agua dentro de la olla deberá llegar a 120° C para hervir. Esta temperatura más alta hace que los alimentos se cuezan más rápidamente. En una olla abierta, el agua hierve a 100° C, y su temperatura no pasará de este valor.

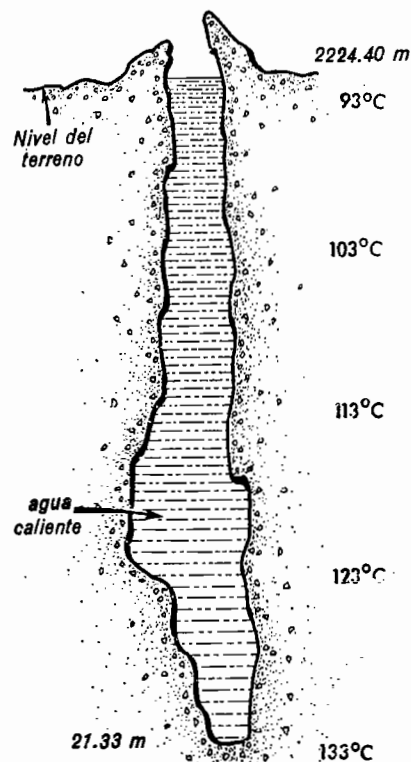


Fig. 17G. Diagrama de un géiser como El Viejo Fiel del Parque Nacional de Yellowstone.

17.6 Los géiseres. Una de las grandes maravillas del mundo occidental es la erupción espontánea del gigantesco géiser *El Viejo Fiel* del Parque Nacional de Yellowstone, en los Estados Unidos. La explicación siguiente de la actividad del géiser, fue dada por primera vez por Bunsen en 1847 y se basa en el fenómeno de ebullición descrito anteriormente.

El agua de algún arroyo cercano se cuele en una grieta o agujero vertical, y ahí, debido al calor volcánico interior, se calienta gradualmente, hasta la temperatura de ebullición (ver la fig. 17G). A causa de que el agua se calienta desde abajo, y que las corrientes de convección son detenidas debido a lo estrecho de la grieta, se llegará a una temperatura considera-

blemente más alta que 100° C antes de que el agua del fondo pueda hervir. Ya que se está ejerciendo la presión atmosférica en la superficie libre superior, el agua hervirá a 100° C. Dentro de la grieta, la presión adicional de unos 20 m de agua requiere una temperatura de 130° C para producir la ebullición. Debido a que el agua se calienta por abajo, esta temperatura más alta se logra cerca del fondo y la ebullición empieza allí antes de presentarse en la parte superior. Cuando se llega a una temperatura suficientemente elevada, la presión del vapor, allá en el fondo, excede a la presión debida al aire y a la columna de agua sobre ella, y produce numerosas burbujas que empujan la columna de agua que está encima e inician la erupción. Al llegar a la superficie el agua sobrecalentada, su presión de vapor es tan grande que empuja con fuerza gran parte del agua hacia afuera.

Se puede efectuar una demostración excelente de estos principios con un géiser experimental de la forma ilustrada en la fig. 17H. Estos modelos se pueden hacer casi de cualquier tamaño, desde 30 cm hasta más de 3 m de altura. El período de

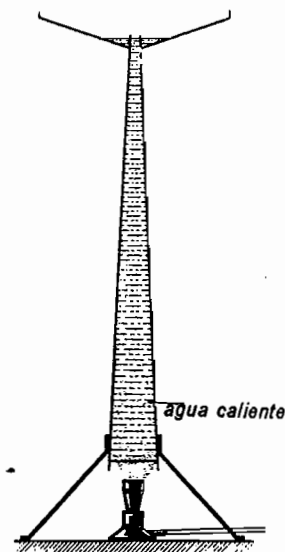


Fig. 17H. Géiser experimental que hará erupción periódicamente.

erupción depende del tamaño y de la cantidad de calor aplicada.

17.7 Ebullición a temperaturas bajas.

Así como se puede hacer que el agua hierva a temperaturas más altas que 100° C por aumento de la presión, también se puede hacerla hervir a temperaturas inferiores a 100° C reduciendo la presión atmosférica. Por razón de la importancia práctica, que tiene este hecho, básico, se dará una explicación detallada. La figura 17E es la gráfica de las tensiones del vapor de agua saturado, y representa las condiciones en las cuales el agua y el vapor saturado pueden existir juntos en estado de equilibrio.

Ya que la ebullición en la superficie del agua tiene lugar cuando la tensión del vapor saturado se hace igual a la presión atmosférica, se deduce que, al disminuir esa presión, se podrá llegar a la ebullición con una tensión de vapor más baja. La línea curva de la gráfica, por lo tanto, servirá como curva de los puntos de ebullición; todas las presiones y temperaturas a la derecha, representan el estado de vapor o gas, y todos los puntos a la izquierda, el estado líquido.

Consideremos, por ejemplo, el agua a su temperatura de ebullición normal de 100° C y a la presión de 76 cm de Hg. Para elevar su temperatura sin elevar la presión, debe agregarse calor para vaporizar el agua y producir vapor. Para bajar su temperatura, se debe perder calor para licuar el vapor y se debe quitar después más calor para bajar la temperatura de toda el agua.

Para ir un poco más adelante, suponemos que se pone agua a la temperatura ambiente de 30° C en una campana de vacío como se ve en la fig. 17I, y que se reduce lentamente la presión mediante una bomba de vacío. Empezando en el punto A de la gráfica 17E, se disminuye la presión hasta llegar a B, cerca de 3.18 cm de Hg, donde empezarán a formarse burbujas, y comenzará a hervir el agua. Para evaporarla, se requiere calor, éste se obtie-



Fig. 17I. La temperatura de ebullición baja al disminuir la presión atmosférica. El agua hierve y se congela simultáneamente en el vacío.

ne del agua restante, enfriándola a una temperatura más baja. La reducción continuada de la presión, produce la ebullición permanente y una continua reducción de la temperatura hasta que se alcanza finalmente el punto de congelación a 0° C. La evaporación continua enfría la superficie hasta que se forma hielo sobre la superficie del agua hirviendo. Aquí estamos en una condición en que el agua hierve y se congela al mismo tiempo y a 0° C. (El pequeño vaso con ácido sulfúrico, H_2SO_4 , puesto dentro de la cámara de vacío, absorbe el vapor de agua, ayudando a la bomba a mantener la presión suficientemente baja.)

Aunque el agua al nivel del mar, a la presión atmosférica normal, hierve a 100° centígrados, a mayores altitudes hierve a temperaturas más bajas. La prueba de este hecho es bien conocida de aquellos que hacen excursiones a las montañas altas. Allí, donde la presión atmosférica es menor, se necesita más tiempo de lo normal para cocinar alimentos. Las temperaturas de ebullición dadas en la Tabla 17B, marcan los valores específicos a diferentes elevaciones.

Al volar a grandes alturas, el agua de los motores enfriados por agua hierve a temperaturas más bajas. A una altura de 10 km, la gasolina hierve a la temperatura de 65° C. A 20 km de elevación, la sangre del cuerpo humano hierve a la temperatura de 37° C.

TABLA 17B. PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y TEMPERATURAS DE EBULLICIÓN A VARIOS NIVELES POR ENCIMA Y DEBAJO DEL NIVEL DEL MAR

Altura en el aire		Temp. de ebullición ° C	Presión atmosférica		
ft	metros		cm de Hg	newtons/cm ²	lb/in ²
100 000	30 480	9.8	0.82	0.11	0.16
50 000	15 240	48.9	8.75	1.18	1.7
40 000	12 190	58.8	14.1	1.87	2.7
30 000	9 140	69.2	22.5	3.04	4.4
20 000	6 100	79.6	35.0	4.68	6.7
15 000	4 570	84.4	42.4	5.66	8.2
10 000	3 050	89.8	52.2	7.00	10.1
8 000	2 440	92.1	56.8	7.60	11.0
6 000	1 830	94.0	61.0	8.15	11.8
4 000	1 220	96.0	65.6	8.76	12.7
2 000	600	98.0	70.2	9.40	13.7
Nivel del mar		100.0	76.0	10.13	14.7
-20	-6.5	113.7	121.0	16.20	23.4
-40	-13.0	123.3	165.0	22.10	32.0
-60	-20.0	131.2	210.0	28.20	40.7
-80	-26.0	138.0	255.0	34.20	49.4
-100	-30.0	144.0	300.0	40.30	58.0
-120	-36.5	149.0	345.0	46.30	66.7
ft	metros	° C	cm de Hg	newtons/cm ²	lb/in ²
Profundidad bajo el agua		Temp. de ebullición	Presión total atmósfera + agua		

17.8 Licuefacción del aire. Este método de licuar el aire y otros gases, se basa en el principio del enfriamiento por dilatación. Éste fue el método por el cual Dewar* licuó oxígeno por primera vez

* Sir James Dewar (1842-1923), químico y físico inglés, notable principalmente por sus experimentos sobre la licuefacción de los llamados gases permanentes. De niño fue muy aficionado a la música y cuando no pudo seguir tocando la flauta debido a un accidente, se puso a fabricar violines. En este trabajo desarrolló una destreza que le resultó muy útil en años posteriores. Educado en la Universidad de Edimburgo, tuvo varios puestos de profesor. En 1891, Dewar obtuvo éxito en la licuación del oxígeno por primera vez. Le confirieron la Medalla Rumford de la Real Sociedad Británica en 1894 y fue armado caballero en 1904. Construyó una gran fábrica de refrigeración en la Institución Real de Londres, con la cual se licuó por primera vez el hidrógeno a la temperatura de -252°C , en 1898, y se soli-

en 1891, y Linde licuó el aire en 1895. El oxígeno se convierte en líquido a la temperatura extremadamente baja de -184°C centígrados y el aire a -191°C . En la escala Fahrenheit corresponden a -300°F y -312°F , respectivamente.

En la máquina de aire líquido de la fig. 17J, se comprime aire mediante una bomba a una presión de unas 20 atmósferas. Debido a la compresión, se calienta el aire a una temperatura bastante elevada. Por esto, debe ser enfriado haciéndolo pasar por el depósito refrigerador. Este

difícil el hidrógeno a temperatura todavía más baja, en 1899. Para sus colaboradores, fue conocido como un experimentador de habilidad extraordinaria y un conferenciante de notable elocuencia.

aire frío y comprimido, pasa a través del tubo interior de un serpentín de doble pared, B, y escapa a través de la abertura estrecha de una válvula de aguja, A. El aire que escapa se dilata tanto que su temperatura llega a ser considerablemente

tanque enfriador, para recorrer de nuevo el circuito. El ciclo se repite hasta que en la región V, la temperatura es tan baja que se forman gotas de aire líquido en el chorro que sale de la válvula de aguja. Estas gotas caen en un frasco Dewar y

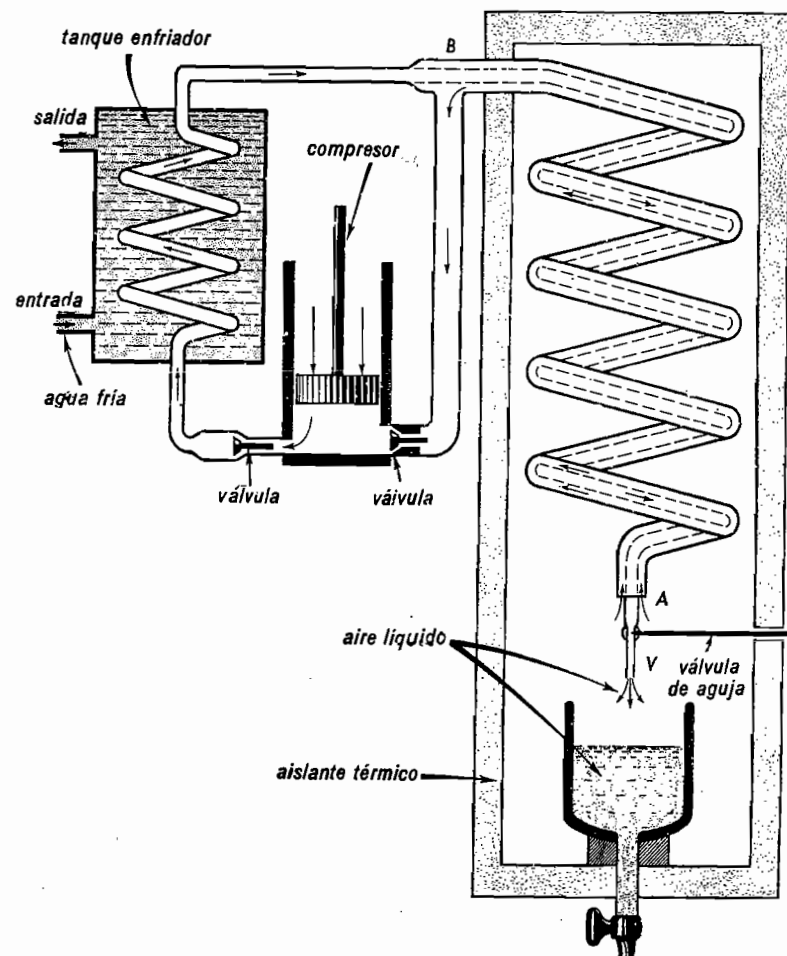


Fig. 17J. Corte transversal de una máquina para licuar aire.

inferior a la del ambiente. El continuo bombeo del compresor saca este aire a través del tubo exterior del serpentín, lo cual enfría el aire comprimido que va entrando hacia la válvula de aguja. Este aire vuelve a comprimirse y a enfriarse en el

se acumulan allí para ser apartadas posteriormente.

17.9 La licuefacción del hidrógeno y el helio. El hidrógeno fue licuado por primera vez por Dewar, a la temperatura

de -252°C , en 1898, y el helio fue licuado por primera vez por Onnes,* a la temperatura de -268°C , en 1908.

La producción de hidrógeno líquido, necesita de grandes cantidades de aire líquido. Primero se comprime el hidrógeno a una presión muy alta, y luego se enfría mediante el aire líquido. Después se le permite expandirse en un intercambiador semejante al usado para licuar el aire en la fig. 17J. Para licuar el helio, también se requiere una cantidad considerable de hidrógeno líquido. Se comprime el gas, se enfría mediante el hidrógeno líquido y luego se le deja dilatar.

Haciendo hervir helio en un vacío parcial, Onnes enfrió helio líquido a una temperatura de sólo 0.82°C por encima del cero absoluto.

17.10 Experimentos con aire líquido. A temperaturas extremadamente bajas, las propiedades físicas de la materia son muy diferentes de sus propiedades a la temperatura ambiente. Esto puede demostrarse por varios experimentos con pequeñas cantidades de aire líquido. El aire líquido tiene la misma apariencia y densidad que el agua. Cuando se vacía en un frasco de Dewar, hierve vigorosamente hasta que el recipiente se enfría a la temperatura del aire líquido. Una pequeña espiral de alambre de plomo enfriada en aire líquido, se hace elástica y trabaja como un resorte. Un tubo de goma o los pétalos de una flor, se hacen duros y quebradizos como si fueran de vidrio. Una pelota hueca de goma no rebota, sino que se rompe en pedacitos la primera vez que choca con el suelo. Un racimo de uvas, un huevo o un trozo de carne, presentan la misma dureza y se quiebran como vidrio.

El mercurio y la gasolina se congelan cuando son enfriados en aire líquido. Por

ejemplo, se puede hacer un martillo para clavos, vaciando mercurio en un pequeño vaso rectangular de papel que tenga un mango de madera y luego congelándolo. Ver la figura 17K.

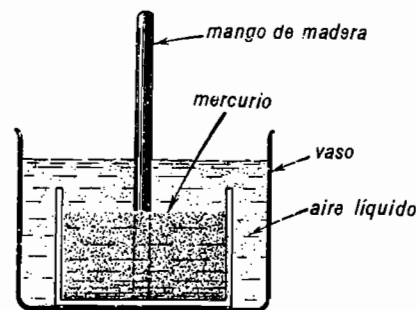


Fig. 17K. Cómo hacer un martillo de mercurio.

Una campanilla de plomo, golpeada con un badajo de acero produce un tono sordo cuando está a temperatura normal, pero si se baja la temperatura a la del aire líquido, producirá un tono tintineante al golpearla el mismo badajo. Ver la figura 17L.

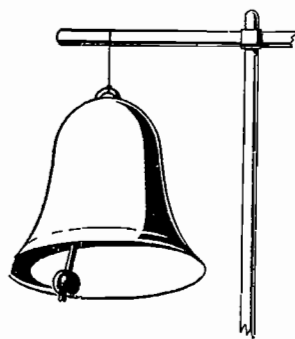


Fig. 17L. Una campana de plomo enfriada a la temperatura del aire líquido da un tono metálico.

Si el aire líquido se deja en reposo por algún tiempo, el nitrógeno empezará a hervir dejando oxígeno casi puro en la fase líquida. Los cigarrillos o cigarros empapados por unos segundos en oxígeno líquido y luego encendidos con una cerilla, arde-

rán rápidamente como si fueran fuegos artificiales. Una viruta de lana o algodón presentará el mismo efecto, pero se incendiará en forma aún más explosiva. Se pueden usar cartuchos que contengan polvo de madera o corcho carbonizado, em-

papados de oxígeno líquido, para producir explosiones y mover grandes cantidades de tierra, para ello, el cartucho, ya empapado en oxígeno líquido, es metido dentro de la roca por un orificio, y se incendia por medio de un fusible o una chispa eléctrica.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Depende de la presión la temperatura de ebullición de un líquido? De ser así, ¿por qué?

2. ¿Cuáles son los principios del funcionamiento de las ollas de presión? ¿Llega el agua a una temperatura mayor?

3. ¿Cuáles son los principios de operación de un géiser como *El viejo fiel* del Parque Nacional de Yellowstone?

4. Definir o explicar brevemente lo siguiente: a) humedad absoluta, y b) humedad relativa.

5. Explicar por qué la evaporación de un líquido produce el enfriamiento del líquido residual.

6. ¿Puede el agua hervir a 90°C de temperatura? ¿Puede el agua hervir a la temperatura ambiente de 25°C ? ¿Puede el agua hervir a su temperatura de congelación?

7. ¿Varía la temperatura de ebullición del agua con la altitud? ¿Cuánto baja la temperatura de ebullición del agua por cada 1000 ft de elevación?

8. ¿Por qué se cuece más lentamente la comida en lo alto de las montañas? ¿Podría acelerarse el cocimiento de los alimentos con una olla de presión en lo alto de las montañas?

9. Hacer un diagrama de una máquina de aire líquido. Describa brevemente cómo produce aire líquido.

10. Usando los valores dados en la Tabla 17B, hacer una gráfica de la altitud contra el punto de ebullición del agua. Hacer la gráfica hasta 6100 m. De esta gráfica encuentre el punto de ebullición del agua a una altitud de uno y dos kilómetros.

11. ¿A qué temperatura hervirá el agua a una altitud de 13 000 ft? Use la Tabla 17B y la fig. 17E. (Resp. 86.5°C .)

12. ¿A qué altura hervirá el agua a 85°C centígrados? Use la Tabla 17B y la fig. 17E.

13. Si la humedad relativa es de 25% cuando la temperatura del aire es de 30°C , ¿cuál es la humedad absoluta? (Resp. 7.5 g/m^3 .)

14. La humedad absoluta es de 12.5 g/m^3 cierto día, cuando la temperatura es de 25°C . ¿Cuál es la humedad relativa?

15. Si la humedad absoluta es de 14.2 g/m^3 en un día en que la temperatura es de 32°C , ¿cuál es la humedad relativa? (Resp. 42.8%.)

16. Si la humedad relativa es de 60% cuando la temperatura es de 86°F , ¿cuál es la humedad absoluta?

17. Cuando la temperatura es de 95°F , se encuentra que la humedad relativa es de 40%. ¿Cuál es la humedad absoluta? (Resp. 15.7 g/m^3 .)

18. ¿Cuál es la temperatura del hidrógeno líquido y del helio líquido en grados Fahrenheit?

19. Si al nivel del mar el medidor de una olla de presión indica 15 lb/in^2 , ¿cuál es la temperatura del agua que está hirviendo dentro de ella? Ver la fig. 17E y la Tabla 17B. (Resp. 120°C .)

20. ¿A qué presión manométrica debe mantenerse una olla de presión si se quiere mantener en su interior el agua hirviendo a 110°C ? Ver la fig. 17E.

21. Si un metro cúbico de aire contiene 22 g de vapor de agua y la temperatura es

* Kammerlingh Onnes (1852-1926), físico experimental holandés, principalmente notable por sus experimentos efectuados con sustancias a muy bajas temperaturas y por su descubrimiento de la superconductividad. En 1908 logró por primera vez licuar el helio. En 1913 se le concedió el Premio Nobel de Física.

de 95°F , ¿cuál es la humedad relativa? (Resp. 56.1%.)

22. Si la humedad absoluta es de 14 g de vapor de agua por metro cúbico de aire y la humedad relativa es de 60%, ¿cuál es la temperatura?

23. Cuando la humedad relativa cierto día es de 55%, se encuentra que la humedad absoluta es de 12.5 g de vapor de agua por metro cúbico de aire. ¿Cuál es la temperatura? (Resp. 77°F .)

24. ¿A qué profundidad en el interior de un géiser hervirá el agua a 130°C ? Ver la Tabla 17B para la presión necesaria.

25. ¿A qué profundidad dentro de un géiser hervirá el agua a 125°C ? Ver la Tabla 17B. (Resp. 13.5 m ó 44.3 ft.)

26. La abertura de un tubo en la tapa de una olla de presión tiene un área de 0.10 cm^2 , ¿qué fuerza en newtons debe ejercerse sobre esta abertura si la temperatura de ebullición del agua en el interior es de 130°C ? Ver la fig. 17F y la Tabla 17B.

18

VIBRACIONES Y ONDAS

18.1 Movimiento armónico simple. Cualquier movimiento, simple o complejo, si se repite en intervalos iguales de tiempo, se llama movimiento periódico. Hay muchos ejemplos en la vida diaria que dan origen a un tipo especial de movimiento periódico que se llama *movimiento armónico simple*. El balanceo del péndulo de un reloj o la vibración de un diapason, son buenos ejemplos del movimiento armónico simple. Se les aplica el nombre de movimiento armónico simple porque cada uno de ellos puede describirse en función del movimiento más simple de todos los movimientos periódicos, el *movimiento circular uniforme*.

El movimiento armónico simple se define como la proyección sobre cualquier diámetro, AB , de un punto que recorre

tersección P tendrá un movimiento armónico simple. Al moverse atrás y adelante a lo largo del diámetro AB , cambia continuamente la velocidad v_x del punto P . En el punto C tiene su valor máximo, mientras que en los puntos A y B llega momentáneamente al reposo. Partiendo de cualquier extremo de su trayectoria, la velocidad aumenta hasta llegar a C , desde allí disminuye volviendo al reposo en el extremo opuesto de la trayectoria.

El desplazamiento de un movimiento armónico simple, se define como la distancia desde el centro C hasta el punto P . Como se ve en la fig. 18A, el desplazamiento x varía en magnitud desde cero en C , hasta r , el radio del círculo de referencia, en A o en B .

La amplitud r se define como el valor máximo del desplazamiento x , y el período se define como el tiempo necesario para efectuar una vibración completa.

Si se inicia una vibración en A , no se completa hasta que el punto vuelve otra vez a A , habiendo pasado por B . Si se inicia en C y se mueve hacia B y vuelve a C , sólo ha efectuado media vibración. La amplitud r se mide generalmente en centímetros y el período T en segundos.

La frecuencia del movimiento armónico se define como el número de vibraciones completas efectuadas en un segundo. Por ejemplo, si un objeto vibrante en particular, efectúa una vibración en medio segundo (el período, $T = 1/2\text{ seg}$), entonces realizará dos vibraciones completas en un segundo (la frecuencia, $n = 2\text{ vib/seg}$). Si ahora el cuerpo completa una vibración en un décimo de segundo, $T = 1/10\text{ seg}$, efectuará 10 vibraciones en 1 seg,

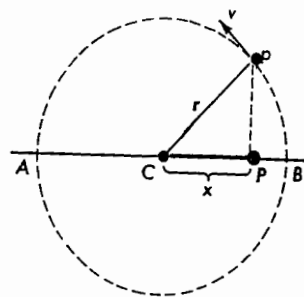


Fig. 18A. Movimiento armónico simple a lo largo de un diámetro AB .

una circunferencia con rapidez uniforme. Esto se ilustra en la fig. 18A. El punto p se mueve recorriendo la circunferencia de radio r con una rapidez uniforme v . Si en cada instante se traza una perpendicular del punto p al diámetro AB , la in-

$n = 10$ vib/seg. En otras palabras, n y T son recíprocas entre sí.

$$\text{período} = \frac{1}{\text{frecuencia}} \quad (18a)$$

6

$$\text{frecuencia} = \frac{1}{\text{período}}$$

Expresado algebraicamente,

$$T = \frac{1}{n}; \quad n = \frac{1}{T} \quad (18b)$$

Puede obtenerse un ejemplo de un cuerpo móvil con movimiento armónico simple, con una masa fijada al extremo de un resorte como se ve en la fig. 18B. En

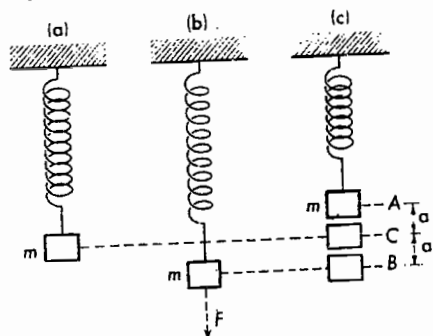


Fig. 18B. La masa en el extremo del resorte efectúa movimiento armónico simple.

el diagrama (a) el resorte S y la masa m cuelgan en su posición de equilibrio. En (b) se ha aplicado una fuerza F para estirar el resorte desplazando la masa a una distancia a . Desde que se deja libre, la masa se mueve hacia arriba y abajo con movimiento armónico simple. En el diagrama (c) se presenta el resorte comprimido por la masa m en el punto más alto de la vibración.

18.2 Varillas vibrantes. Si se fija firmemente por un extremo una varilla de madera o de metal, como se ve en la figura 18C, se la puede poner en un estado natu-

ral de vibración. Desplazando hacia un lado y dejando después en libertad el extremo libre de la varilla, se moverá a uno y otro lado con movimiento armónico simple. Si se aumenta la masa m que se fijó en el extremo libre de la varilla, disminuirá la frecuencia de las vibraciones, mien-

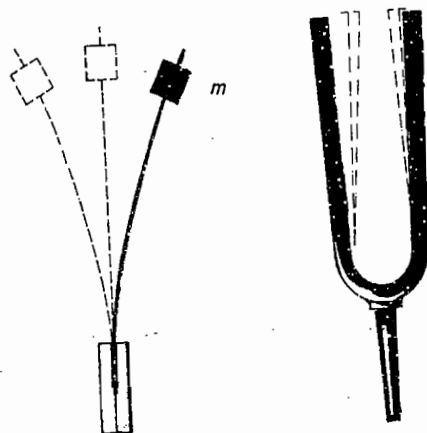


Fig. 18C. Vibración de, (a) una varilla fija por un extremo y cargada en el otro y (b) los brazos de un diapason.

tras que si se hace más rígida la varilla, ya sea aumentando su grueso o disminuyendo su longitud, la frecuencia aumentará.

En el diagrama (b) se presenta un diapason como los que usan los músicos para afinar sus instrumentos. Golpeando un brazo del diapason contra cualquier objeto, se produce la vibración simultánea de los dos brazos en direcciones opuestas. Cuanto más delgados sean los brazos del diapason, más baja será la frecuencia de la vibración. Cuanto más cortos sean los brazos, mayor será dicha frecuencia.

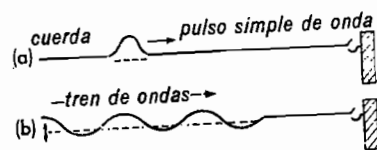


Fig. 18D. Ejemplos de ondas transversales producidas a lo largo de una cuerda.

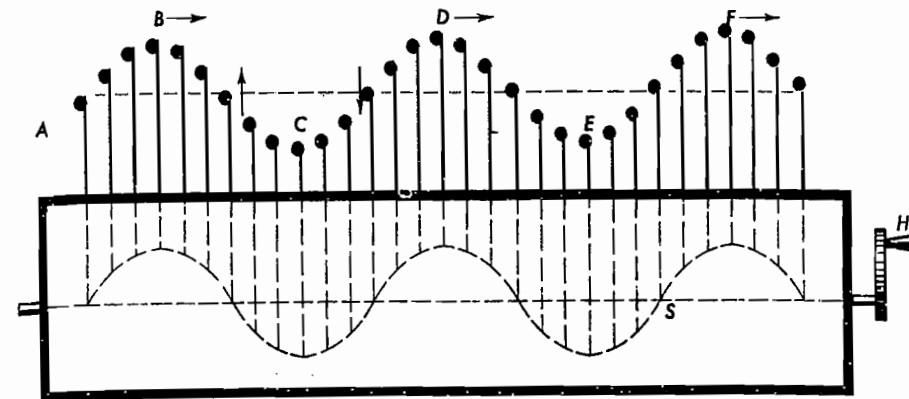


Fig. 18E. Máquina de ondas demostrando las ondas transversales.

Los diapasones son usados con fines científicos, además de usarlos los músicos como modelos de tono. Como instrumentos científicos, desempeñan una función muy útil marcando intervalos de tiempo, cortes e iguales. El diapason común usado con este propósito, suele tener una frecuencia de mil vibraciones por segundo, $n = 1000$ vib/seg, y se mantiene vibrando por medio de un circuito eléctrico semejante al de los timbres.

cuerda de violín rotada, son buenos ejemplos de ello.

Supongamos que el extremo lejano de una cuerda se fija a un poste, como se ve en la fig. 18D (a), y que el otro extremo (b), que se tiene en la mano, recibe un brusco movimiento hacia arriba y abajo. La perturbación enviada a lo largo de la cuerda viaja hasta llegar al poste, como se ve en la figura, y se refleja después volviendo hacia la mano. Este tipo de onda se llama *impulso simple de onda*. Si en lugar de un impulso brusco se mueve la mano hacia arriba y abajo con movimiento armónico simple, viajará un *tren de ondas*, como se ve en el diagrama (b).

Cuando se hacen vibrar los brazos de un diapason, producen un movimiento ar-

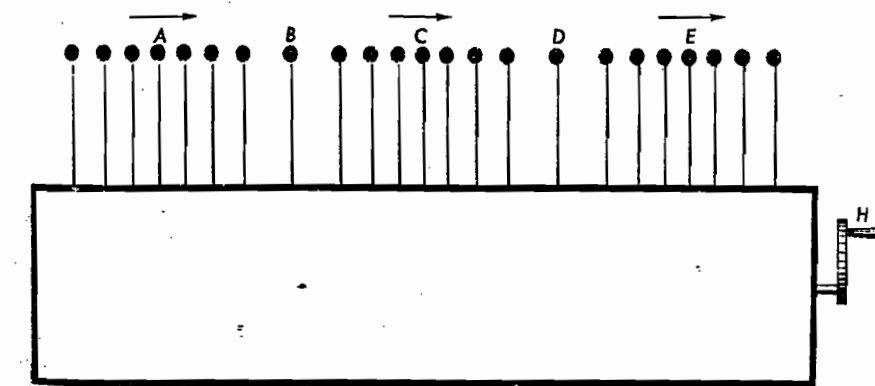


Fig. 18F. Máquina de ondas demostrando ondas longitudinales.

mónico simple en el aire que los rodea. Cada brazo golpea periódicamente a las moléculas de aire inmediatas; estas moléculas, a su vez, golpean a otras, transmitiendo más allá la perturbación. Al progresar hacia afuera en todas direcciones, estas perturbaciones constituyen las ondas sonoras.

18.4 Ondas transversales. Las ondas transversales son aquellas en que cada partícula se mueve en una línea perpendicular a la dirección en que se propaga la onda. Todas las partículas vibran dentro de un solo plano a lo largo de una línea de transmisión. En la fig. 18E se ilustran estas ondas por medio de una máquina creadora de ondas, diseñada con este propósito. Conforme se hace girar el mango *H* a un lado o al otro, las pequeñas esferas superiores se mueven subiendo y bajando con movimiento armónico simple. Mientras se mueven hacia arriba y abajo, cada una de ellas en su propia línea vertical, la onda *ABCDEF* se moverá hacia la derecha o hacia la izquierda. La luz es otro ejemplo de movimiento ondulatorio transversal.

18.5 Ondas longitudinales. Las ondas longitudinales son aquellas en las que la vibración de cada partícula tiene lugar

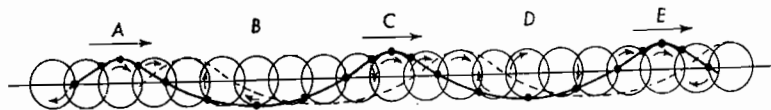


Fig. 18G. Ondas en el agua (olas). Cada molécula describe un círculo o elipse al pasar la onda. Es una combinación de ondas longitudinales y transversales.

a lo largo de una línea recta paralela a la dirección en que se propaga la onda. Este tipo de onda se ilustra en la fig. 18F, con otra máquina productora de ondas. Conforme se hace girar el mango *H*, cada pequeña esfera se mueve horizontalmente en el plano del dibujo, con movimiento armónico simple. Al hacer esto, las zonas *B* y *D* de enrarecimiento y las zonas de condensación *A*, *C* y *E*, se mueven hacia

la derecha, conservando siempre sus mismas distancias relativas.

Las ondas sonoras en el aire son un ejemplo de ondas longitudinales. Cada molécula de aire vibra hacia atrás y adelante a partir de cierta posición de equilibrio cuando el tren de ondas pasa por ese punto.

18.6 Ondas en el agua. El movimiento de la superficie del agua cuando pasa una ola, es una combinación de ondas transversales y longitudinales. Las moléculas de agua se mueven para atrás y adelante y al mismo tiempo hacia arriba y abajo, es decir, en círculos o elipses. Como se ilustra en la fig. 18G, cada molécula se mueve en un círculo vertical para formar las crestas *A*, *C* y *E*, y los valles *B* y *D* que se van moviendo horizontalmente. Un pequeño corcho colocado sobre la superficie del agua y observado por un lado, exhibirá este movimiento circular. Cuando una persona nada en el mar picado y se le acerca la cresta de una ola, primero es arrastrado hacia arriba y adelante en la dirección en que avanza la ola; después que ha pasado la cresta, cae y es arrastrado hacia atrás.

18.7 Ondas estacionarias. Casi todos los sonidos producidos por instrumentos musi-

cales son el resultado de ondas estacionarias. Las ondas estacionarias pueden producirse en cualquier sustancia, ya sea sólido, líquido o gas, mediante dos trenes de ondas de la misma frecuencia que viajen en el mismo medio en direcciones opuestas. En la fig. 18H se ve una de las formas de conseguirlo. Se fija un extremo de la cuerda a un poste y el otro extremo, que se mantiene tirante, se mueve hacia

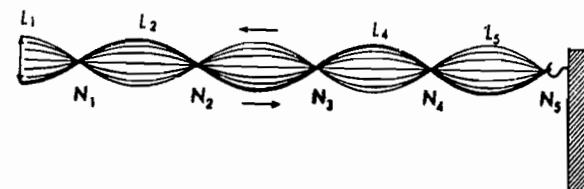


Fig. 18H. Ondas estacionarias producidas al reflejarse un tren de ondas transversales en el extremo de una cuerda.

arriba y abajo con un movimiento armónico simple. Conforme llegan las ondas al extremo fijo de la cuerda, son reflejadas y al regreso encuentran a las ondas que vienen detrás de ellas. Si las ondas tienen la frecuencia apropiada, la cuerda soportará los dos trenes de ondas dividiéndose en secciones, como se ve en la figura. Los puntos *L*₁ a *L*₅, donde la cuerda tiene máximo movimiento hacia arriba y abajo, son llamados *antinodos*, y los puntos sin movimiento que quedan entre ellos son

la fig. 18I (a). Se fija el extremo derecho del resorte y el extremo izquierdo se mueve hacia adelante y atrás con movimiento armónico simple. Si las vibraciones producidas tienen la frecuencia apropiada, las ondas que avanzan hacia la derecha encuentran a las ondas reflejadas que regresan hacia la izquierda, producirán *nodos* y *antinodos*. Los nodos, *N*, corresponden a puntos donde no hay movimiento, y los antinodos, *L*, a puntos donde el movimiento es máximo. Los puntos del diagrama

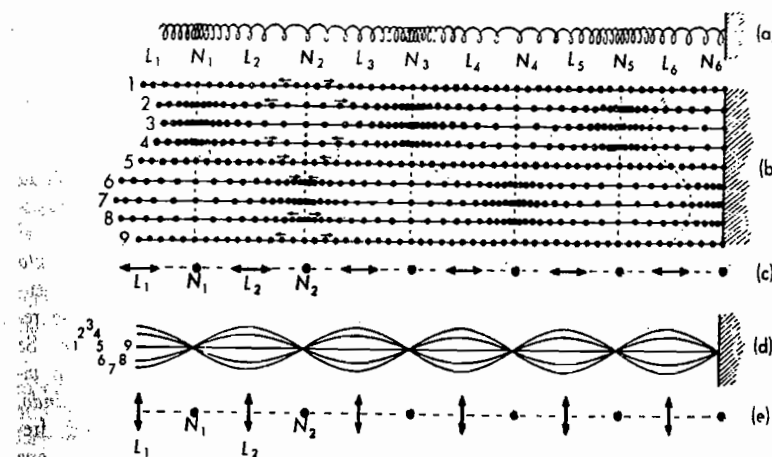


Fig. 18I. Ondas estacionarias producidas por: (a) las ondas longitudinales de un resorte, (b) las ondas longitudinales del sonido en el aire y (d) las ondas transversales de una cuerda; (c) y (e) indican la dirección de la vibración en los antinodos.

llamados *nodos*. La línea gruesa representa la cuerda en cierto instante y las otras líneas la representan en otros momentos. Las ondas estacionarias de vibraciones longitudinales se pueden demostrar con un resorte flexible y largo, como se ve en

(b) indican las posiciones y movimientos relativos de cada espira individual del resorte en nueve momentos diferentes durante una vibración completa. Los puntos de los nodos se mantienen fijos en todo momento, mientras que los de los antinodos

se mueven para delante y atrás como señalan las flechas del diagrama (c). En el instante (3), se forman compresiones en los nodos N_1 , N_3 y N_5 y enrarecimientos en los nodos pares N_2 , N_4 , N_6 . Media vibración más tarde, en (7), se intercambian quedando los nodos de compresión convertidos en nodos de enrarecimiento y viceversa.

En los diagramas (b), (c), (d) y (e) de la fig. 18I, se presenta una comparación directa de las ondas estacionarias transversales y longitudinales. Los números 1, 2, 3, etcétera, indican los estados correspondientes de las vibraciones de uno y otro. El diagrama (c) indica las ampli-

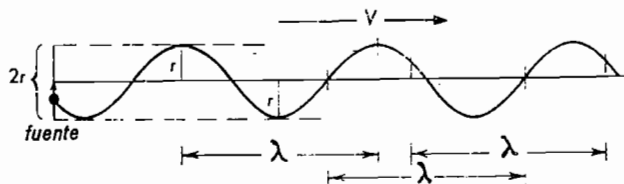


Fig. 18J. La longitud de onda λ es la distancia entre los puntos correspondientes de dos ondas sucesivas, y la amplitud r es el máximo del desplazamiento.

tudes de los movimientos longitudinales de los antinodos del resorte, y el diagrama (e) los movimientos transversales de los antinodos de la cuerda.

Debe explicarse que los puntos del diagrama (b) también representan los movimientos de las moléculas de aire, cuando se reflejan las ondas sonoras en una pared plana, regresando sobre ellas mismas para producir ondas estacionarias. Como veremos en el siguiente capítulo, así son las vibraciones de aire producidas dentro de un tubo de órgano, una flauta y otros instrumentos musicales de viento.

Aunque las ondas sonoras en el aire son vibraciones longitudinales, por conveniencia se acostumbra dibujarlas como ondas transversales. Por esto era necesario que hiciéramos la comparación de la fig. 18I. En los dos capítulos siguientes dibujaremos las ondas sonoras como si fueran ondas transversales.

18.8 Longitud de onda. Cuando un objeto vibrante produce ondas en un medio homogéneo, las ondas avanzan con velocidad constante. Si la fuente vibra con movimiento armónico simple y las ondas son transversales, tendrán la apariencia de las ondas dibujadas en la fig. 18J. La longitud de onda se define como la distancia entre los puntos semejantes de dos ondas consecutivas, y se representa con la letra griega λ . La distancia entre las crestas de ondas consecutivas, por ejemplo, es igual a una longitud de onda.

La amplitud de la onda se define como el valor máximo del desplazamiento. Esto se representa con r en la fig. 18J; la am-

plitud de la onda es igual a la amplitud de la vibración de la fuente. La frecuencia de un tren de ondas se define como el número de ondas que pasan por un punto dado en un segundo. Es igual a la frecuencia de la vibración de la fuente y se representa en general con la letra n . Se acostumbra expresar la frecuencia en vibraciones por segundo o ciclos por segundo. De la definición de la velocidad, frecuencia y longitud de onda, vemos que existe una relación muy simple entre ellas:

$$V = n\lambda \quad (18c)$$

La longitud de una onda λ , multiplicada por el número de ondas por segundo, n , es igual a la distancia total recorrida en un segundo, V .

Ya que el período se define como el tiempo necesario para que pase una onda

por un punto dado, también se aplica a las ondas la relación entre la frecuencia y el período que dimos para las fuentes de vibración en la ecuación (18b).

Ejemplo. Si se mueve un tren de ondas a lo largo de una cuerda con una velocidad de 100 cm/seg y la onda tiene una longitud de 20 cm, ¿cuál es la frecuencia y cuál el período de la fuente?

Solución. Sustituyendo estos valores en el lugar apropiado de la ecuación 18(c), obtenemos

$$100 \text{ cm/seg} = n \times 20 \text{ cm}$$

o sea,

$$n = 100/20 = 5 \text{ vib/seg}$$

Por la ecuación (18b), obtenemos

$$T = 1/5 = 0.2 \text{ seg}$$

La frecuencia es de 5 vib/seg, y el período de 0.2 seg.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Hacer un diagrama y explicar brevemente cada una de las siguientes clases de movimientos ondulatorios: a) ondas transversales; b) ondas transversales estacionarias.

2. Hacer un diagrama y explicar brevemente las siguientes clases de movimientos ondulatorios: a) ondas longitudinales, y b) ondas estacionarias longitudinales.

3. Explicar brevemente la relación entre frecuencia, período, velocidad y longitud de onda.

4. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes: a) movimiento armónico simple; b) desplazamiento, y c) amplitud.

5. Definir o explicar brevemente cada uno de los conceptos siguientes: a) frecuencia; b) período, y c) longitud de onda.

6. Un extremo de un resorte se fija a un soporte rígido y el otro se mueve hacia atrás y adelante para establecer una onda longitudinal estacionaria como se ve en la fig. 18I (a). Si la frecuencia es de 5 vib/seg y la distancia entre nodos es de 30 in, encontrar la velocidad de las ondas.

7. Se producen ondas longitudinales estacionarias en un resorte como en la figura 18I (a). Si la velocidad de las ondas es de 32 ft/seg y la distancia entre nodos es de 12 in, ¿cuál es la frecuencia de: a) la fuente, y b) las ondas? (Resp. a) 16 vib/seg, y b) 16 vib/seg.)

8. Se ata el extremo de una cuerda larga a uno de los brazos de un diapason y el

otro a un soporte rígido. Si el diapason vibra con una frecuencia de 264 vib/seg, enviando ondas a lo largo de la cuerda con una rapidez de 6 in/seg, encontrar la longitud de onda.

9. Un diapason con una frecuencia de 396 vib/seg manda ondas de sonido que tienen una longitud de onda de 36 in. Encontrar la rapidez de las ondas en ft/seg. (Resp. 1188 ft/seg.)

10. Unas ondas transversales, viajando por una cuerda tensa con una rapidez de 42 ft/seg, tienen una longitud de onda de 4.2 in. Calcular la frecuencia.

11. Unas ondas sonoras que viajan por el aire con rapidez de 1140 ft/seg tienen una longitud de onda de 33 in. Encontrar la frecuencia. (Resp. 415 vib/seg.)

12. Unas ondas sonoras, de un diapason, con frecuencia de 480 vib/seg, viajan por el aire con rapidez de 356 m/seg. Encontrar la longitud de onda.

13. Una cuerda de 60 ft cuelga de la campana de una torre. Si la punta inferior es movida para atrás y adelante cuatro veces en un segundo, mandando cuatro ondas completas hacia arriba por la cuerda, las ondas se reflejan arriba y regresan a la punta inferior en un tiempo total transcurrido de 2.8 seg. ¿Cuál es: a) la velocidad de las ondas, y b) la longitud de onda? (Resp. a) 42.9 ft/seg, y b) 10.7 ft.)

14. Una punta de una cuerda de 100 ft se fija a la cornisa de una torre alta y la

otra punta cuelga libre. Si se mueve la punta inferior para atrás y adelante cinco veces por segundo, viajan cinco ondas subiendo por la cuerda y regresan abajo en 4.6 seg. Encontrar: a) la velocidad de la onda, y b) la longitud de la onda.

15. Se producen ondas transversales estacionarias en una cuerda como se ilustran en la fig. 18H. Si la frecuencia de la fuente es de 12 vib/seg y la distancia entre nodos

es de 2.5 ft. ¿Cuál es la rapidez de las ondas a lo largo de la cuerda? (*Resp.* 60 pies por segundo.)

16. Se producen ondas estacionarias transversales en una cuerda moviendo una punta arriba y abajo con movimiento armónico simple. Ver la fig. 18H. Si la distancia entre los nodos es de 28 in y la frecuencia es de 30 vib/seg. ¿Cuál es la velocidad de las ondas en pies por segundo?

19

SONIDO

19.1 Transmisión del sonido. La transmisión del sonido de un lugar a otro, de la fuente al receptor, requiere de un medio material por el cual pueda avanzar. Debe notarse el contraste con la luz, que viaja mejor a través del vacío.

Puede demostrarse que el sonido se transmite por el aire o cualquier gas colocando una pequeña campana dentro de una cámara de vacío, como se representa en la fig. 19A. Conforme se va eliminando

to golpean a otras moléculas de aire contiguas y éstas a su vez golpean a otras. Al llegar a la pared de la cámara, las paredes de vidrio son bombardeadas periódicamente por las moléculas de aire, haciéndolas vibrar. Las paredes a su vez ponen en vibración al aire exterior. Al llegar al oído del observador, esta perturbación golpea el tímpano y hace que también se mueva. Si no hubiera aire para transmitir las vibraciones de la campana a las paredes de la cámara de vacío, nunca podría salir de esta cámara.

Debe hacerse notar en este punto que las ondas sonoras son vibraciones longitudinales. Las esferitas móviles de la máquina de ondas de la fig. 18F representan el movimiento molecular superpuesto a los movimientos irregulares de origen térmico de las moléculas de aire.

La transmisión del sonido a través de los líquidos, puede ilustrarse con el experimento de la fig. 19B (a). Un diapasón, con un disco unido a su base, se hace vibrar y luego se pone en contacto con la superficie del agua de un recipiente. Las vibraciones del diapasón y del disco viajan a través del agua hasta el fondo del recipiente y a la tabla de la masa. Ésta es obligada a vibrar con la misma frecuencia del diapasón, actuando como *caja de resonancia* para hacer más intenso el sonido.

La transmisión del sonido en los sólidos, se muestra en el diagrama (b). Un diapasón vibrante se pone en contacto con el extremo de una barra larga de madera. Las vibraciones longitudinales viajan a todo lo largo de la barra, haciendo que vibre la caja hueca de madera en el otro

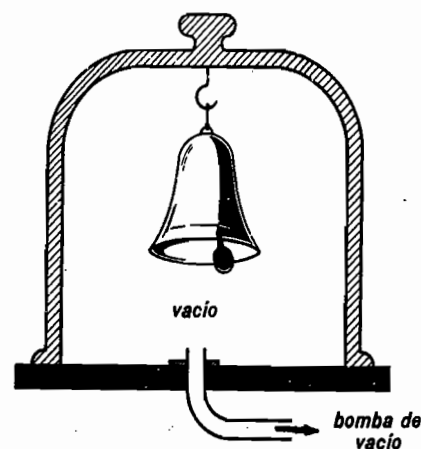


Fig. 19A. Afuera no se oye la campana cuando suena en el vacío.

lentamente el aire de la cámara, se va haciendo más y más tenue el sonido de la campana hasta que, a un vacío elevado, no se oye nada. Tan pronto como se admite de nuevo el aire, vuelve a oírse claramente el sonido de la campana. Ésta, al vibrar, golpea las moléculas de aire, arrojándolas lejos de la superficie metálica. Estas moléculas en rápido movimien-

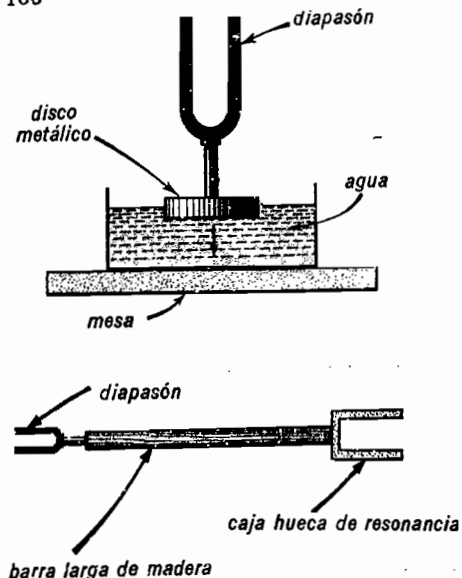


Fig. 198. Demostraciones de la transmisión del sonido: (a) por los líquidos, como el agua; y (b) por los sólidos, como la madera.

extremo. Se oye claramente el sonido que sale de la caja.

19.2 Velocidad del sonido. Aunque la luz y el sonido viajan con velocidades definidas, la velocidad de la luz es tan grande en comparación con la del sonido que un destello instantáneo puede considerarse que no necesita tiempo para viajar muchos kilómetros. Cuando vemos la luz de un rayo que cae lejos y oímos después el trueno, sabemos que la diferencia de tiempo se debe a la velocidad relativamente lenta del sonido. Sabiendo que el sonido necesita un segundo para viajar 330 m aproximadamente, se puede calcular la distancia donde cae la tormenta, con el segundero de un reloj. De modo semejante, cuando arranca un tren a distancia y nosotros vemos la primera nube de humo al arrancar, no se recibe el sonido correspondiente sino hasta después de un tiempo apreciable.

Las primeras medidas de la velocidad del sonido, fueron hechas en 1640 por Marin Mersenne, un físico francés, y en 1656 por Giovanni Borelli y Vincenzo Vi-

viani, físicos italianos. Desde entonces, muchos experimentadores han mejorado estas primeras medidas usando diferentes métodos y aparatos. Las mediciones más recientes, y probablemente más exactas, son las que hizo en 1934 Miller.* Usando los cañones de la defensa costera de Norteamérica como fuente de sonido y poniendo receptores colocados a ciertas distancias entre sí, hizo determinaciones muy exactas de velocidad. Los resultados le dieron una velocidad de 331 m/seg a la temperatura de 0° C. Esto equivale a 1 087 ft/seg.

Como regla general, el sonido viaja en los sólidos y líquidos más aprisa que en los gases. Esto puede ilustrarse por las velocidades medidas en unas cuantas sustancias comunes, que se dan en la Tabla 19A.

TABLA 19A. VELOCIDAD DEL SONIDO EN DIFERENTES SUSTANCIAS

Sustancia	Velocidad en m/seg	Velocidad en ft/seg
Aire (a 0° C) ..	331	1 087
Hidrógeno	1 269	4 165
Agua	1 435	4 708
Alcohol	1 213	3 890
Hierro	5 130	16 820
Vidrio	5 000	16 140

Es bien sabido que la temperatura tiene un efecto pequeño, pero medible, sobre la velocidad del sonido. Por cada grado centígrado de aumento en la temperatura, la velocidad del sonido en el aire aumenta en 61 cm/seg. Escrito como ecuación,

$$V = V_0 + 0.61t \quad (19a)$$

* Dayton C. Miller (1866-1940), físico americano, famoso por sus experimentos sobre la calidad de los sonidos musicales. Formó la más grande colección de flautas del mundo. Estos instrumentos los dejó al Instituto Smithsonian de Washington, donde se exhiben actualmente. Fue miembro de la Academia Nacional de Ciencias de Norteamérica, y presidente de la Sociedad Física Americana; recibió la Medalla Elliot Cresson y la Medalla de Servicio Distinguido de Cleveland.

donde V_0 es la velocidad en metros por segundo a 0° C, y t la temperatura en grados centígrados.

Por cada grado Fahrenheit que suba la temperatura la velocidad en el aire aumenta 1.1 ft/seg. Si la velocidad V_0 está en ft/seg a 32° F, y t es el cambio de temperatura en °F desde 32°, la velocidad V es dada por

$$V = V_0 + 1.1t \quad (19b)$$

Una velocidad de 1 087 ft/seg equivale a 741 mi/h. En las partes altas de la estratósfera, donde la temperatura en el día sube a 200° F, la rapidez del sonido aumenta en 185 ft/seg. Allí, la velocidad es de 1 272 ft/seg, que equivale a 867 millas por hora.

19.3 Tono. El tono de una nota musical se refiere a su posición en la escala musical, y se determina principalmente por la frecuencia de los impulsos de sonido producidos por la fuente vibrante. Se puede

produciendo una nota musical. Conforme la rueda gira lentamente, la frecuencia de vibración de la tarjeta disminuye y la nota baja de tono.

El diagrama (b) es el de una sirena semejante a las usadas en los silbatos de fábricas y en los vehículos de bomberos. La energía de movimiento y el sonido provienen del aire comprimido que sopla a través de los pequeños agujeros del recipiente hueco C. El aire que sale de estos agujeros pasa a través de los agujeros similares del disco giratorio W. Estando los agujeros perforados a un cierto ángulo contrapuesto, como se ilustra en el detalle (d), los chorros de aire que salen de los agujeros estacionarios, ejercen una fuerza sobre los lados de los agujeros del disco móvil W. Conforme gira el disco, cada chorro de aire es interrumpido momentáneamente hasta que el siguiente agujero queda sobre de él. Los impulsos intermitentes de aire producidos por el disco forman una nota musical.

El diagrama (c) de la fig. 19C, representa una sirena en la que un chorro de aire

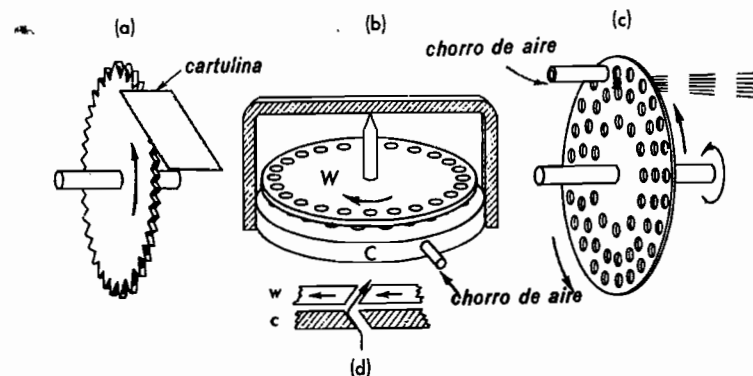


Fig. 19C. Demostraciones acústicas de la relación que hay entre el tono y la frecuencia.

demostrar en muchas formas que el tono depende de la frecuencia. La fig. 19C representa en el diagrama (a) una rueda dentada (llamada rueda de Savart), girando a alta velocidad. Una pequeña tarjeta de cartulina sostenida contra los dientes de la rueda, se pone en vibración

es interrumpido por un disco giratorio con varios anillos de agujeros. Cuando se sopla el aire a través de un anillo de agujeros, los impulsos de aire que salen del lado opuesto producirán una nota cuya frecuencia depende del número de agujeros que tiene el anillo y de la rapidez con que gire

la rueda. Ya que cada anillo puede contener diferente número de agujeros, se puede crear una escala musical y hacerla sonar poniendo el tubo de salida del aire frente a los diferentes anillos en la sucesión apropiada.

Experimentos detallados realizados con observadores entrenados y no entrenados, hace ver que el tono y la frecuencia no son idénticos. El tono es una medida *subjetiva*, por tanto, una *magnitud sensorial* que depende del individuo, mientras que la frecuencia es una *medición física* del número de vib/seg. Por ejemplo, si se aumenta la intensidad de un tono puro de 300 vib/seg, parecerá a la mayoría de los observadores que cambia su calidad y al mismo tiempo disminuye ligeramente el tono. Inversamente, a una alta frecuencia, los aumentos de intensidad parecen elevar el tono.

19.4 Refracción de las ondas sonoras. La desviación de las ondas sonoras en las capas de aire de diferentes temperaturas, recibe el nombre de refracción. Este fenómeno puede observarse en varias formas y se debe a la mayor velocidad del sonido en el aire caliente, comparada con su velocidad en el aire frío (ver la Sección 19.2).

Se encuentra una buena demostración de esto en la observación que se puede hacer al navegar en un lago o río cuando se puede oír música de un radio o fonógrafo bastante alejado, en la noche, y no es posible oírlo en el día. La razón de esto se explica en la fig. 19D. En la noche, el

aire cercano al agua está más frío que el aire de las capas superiores y la velocidad mayor del sonido en el aire caliente, desvía las ondas hacia abajo. Durante el día, el aire que está cerca del agua está más caliente y entonces las ondas son desviadas hacia arriba alejándolas del agua.

Las experiencias recientes de este tipo, han sido efectuadas con sonidos muy fuertes producidos por cañones. Las ondas sonoras refractadas en las capas superiores de la estratósfera indican, con cierta seguridad, la existencia de capas muy calientes de aire a alturas de 40 a 65 km. En estos casos la refracción es semejante a la reflexión producida en la superficie de un espejo, ya que las ondas viajan en líneas más o menos rectas hacia arriba y luego sufren una flexión repentina cuando entran más o menos bruscamente a una capa más caliente.

19.5 El oído humano. El oído es el receptor de sonido más importante y universal. Tiene una enorme amplitud de frecuencias y sensibilidad y puede distinguir entre tonos musicales cuyas frecuencias difieren por menos del 1 por ciento. Además de esto, puede analizar algunos sonidos en sus notas componentes y concentrarse en estas notas una por una separadamente.

El proceso de la audición ha sido discutido durante mucho tiempo por hombres de muy diversas ramas científicas. Aunque la mayoría de los expertos concuerdan en la estructura general y en los movimientos mecánicos que ocurren dentro del oído, todavía existen varias controversias

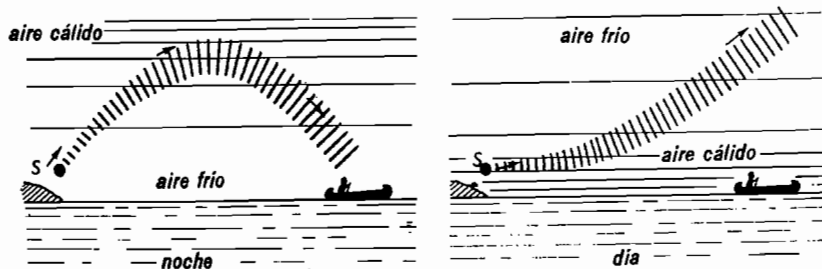


Fig. 19D. La mayor velocidad del sonido en el aire caliente refracta las ondas sonoras hacia abajo en la noche y hacia arriba en el día.

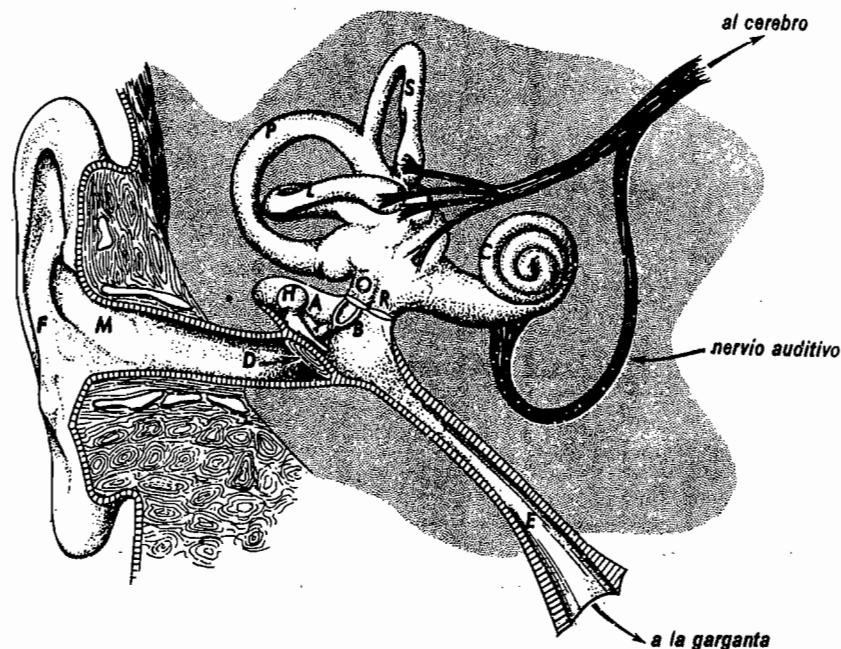


Fig. 19E. Corte transversal del oído humano.

respecto a las funciones de ciertas partes. Todo el mecanismo de audición se divide en tres partes: El *oído externo*, el *oído medio* y el *oído interno* (ver la figura 19E).

El oído externo consiste en el pabellón del oído, *F*, que sirve para recoger las ondas sonoras del exterior, y el canal del oído *M*, que lleva las ondas hasta el tímpano *D*. El oído medio contiene tres pequeños huesos, *H*, *A* y *B*, llamados el *martillo*, el *yunque* y el *estribo*, respectivamente y están conectados a la cavidad nasal, y por ahí, con el aire exterior, por medio de un pequeño canal llamado *trompa de Eustaquio*, *E*. La función de estos tres huesos es transmitir las vibraciones del tímpano a la *ventana oval* del oído interno. El oído interno consiste en dos partes esenciales: el *caracol C (cóclea)* y los canales semicirculares *P*, *L* y *S*. En el caracol se encuentran las terminales nerviosas que son estimuladas por las vibraciones sonoras y producen el sentido de la audición, y en

los canales semicirculares están las terminales nerviosas que producen el sentido del equilibrio.

Todo el oído interno está contenido dentro de una cavidad de la estructura ósea sólida, a veces llamada el *laberinto óseo*. Este laberinto está completamente lleno de un líquido acuoso a través del cual se transmiten las vibraciones sonoras desde el exterior a las membranas sensibles del caracol. El caracol consiste en dos vueltas y media de una cavidad espiral en forma de caracol y dividida a lo largo en tres partes, por la *lámina espiral* y la *membrana de Reissner*. En la fig. 19F se ven secciones transversales del caracol. El diagrama (a) representa una sección transversal cortando una vuelta de la espiral, y el diagrama (b), una sección longitudinal, como se vería si el caracol fuera desarrollado en línea recta.

A todo lo largo de la membrana basilar, que tiene un poco más de 3 cm de largo, hay cerca de 30 000 terminales nerviosas.

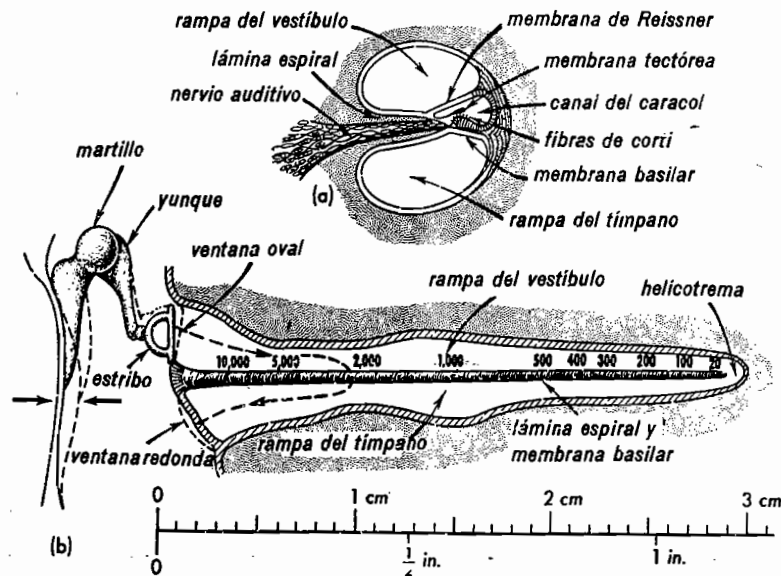


Fig. 19F. Detalle del caracol del oído humano; (a) corte transversal típico y (b) caracol rectificado ilustrando las distintas regiones de la lámina espiral sensibles a los sonidos de diferentes frecuencias.

Esto da 1 000 nervios por milímetro de longitud, que deben pasar a través de la lámina espiral ósea y entrar al nervio auditivo que va al cerebro. El trabajo de muchos experimentadores demuestra que las terminales nerviosas más cercanas a la ventana oval, donde las vibraciones entran a la *rampa del vestíbulo*, responden a las notas de tono más agudo, mientras que aquellas que están en el extremo más distante, responden a los tonos más bajos. Se ven en el diagrama las regiones que responden a cada frecuencia de la escala.

El tímpano y los huesos del oído medio actúan como un mecanismo de palancas para disminuir la amplitud de las vibraciones del aire, un medio más ligero; a las del líquido, un medio mucho más denso. Esta reducción del movimiento produce una presión en el estribo que es de 30 a 50 veces mayor que la ejercida en el tímpano. Conforme el estribo se mueve para adentro y para afuera con una frecuencia baja, se pone en vibración toda la columna líquida, desde la ventana oval pasando por

la *rampa del vestíbulo* a la *helicotrema*, y regresando por la *rampa del tímpano* hasta la ventana redonda. Ya que los líquidos son prácticamente incompresibles, la ventana redonda se mueve hacia afuera cuando la ventana oval y el estribo se mueven hacia adentro y viceversa.

Cuando se hace sonar una frecuencia alta, de unas 2 000 vib/seg, las vibraciones del líquido puesto en movimiento por el estribo en la ventana oval, avanzan por la trayectoria marcada con línea punteada en la fig. 19F, diagrama (b). Conforme las ondas progresan a través de la delgada membrana de Reissner y cruzan la orilla de la lámina espiral, se produce un movimiento relativo entre la *membrana basilar* y la *membrana tectórea*, que hace que las fibras (varillas) de Corti locales estimulen las terminales nerviosas en su base. En algún punto de dicha estimulación y movimiento, una parte de la energía se transforma en impulsos eléctricos, que marchan por el canal del nervio auditivo hasta el cerebro.

19.6 Resonancia o vibraciones por simpatía. Si se afinan dos cuerdas de violín con la misma frecuencia y se hace vibrar una de ellas, la otra colocada a alguna distancia, recogerá las vibraciones y reproducirá la misma nota. Este es un caso de *resonancia*, fenómeno que ocurre sólo cuando dos objetos tienen la misma frecuencia natural de vibración.

En la fig. 19G se ve una demostración experimental de la resonancia. Dos diapa-

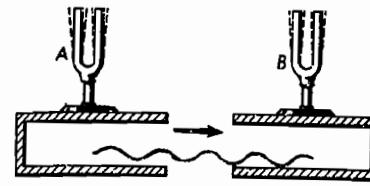


Fig. 19G. Diapasones montados en cajas resonantes para demostrar la resonancia.

sones con el mismo tono exacto son montados en dos cajas huecas separadas, como se ve en la figura. Primero se hace vibrar el diapason A por un momento, y luego se detiene tocando sus puntas con los dedos. Entonces se encuentra que está vibrando el diapason B. Teniendo en cuenta las cajas huecas, cuyo propósito es actuar como cajas de resonancia e intensificar el sonido, la explicación es bien simple. Cada impulso acústico que sale de la caja que vibra con el diapason A, entra a la otra empujando los lados en el momento apropiado para hacer que los brazos del diapason B se muevan en el mismo sentido que cuando llegó el impulso anterior.

19.7 Notas de pulsación. Cuando se hacen sonar juntas dos notas de tonos ligeramente distintos, se oyen pulsaciones. Este fenómeno se usa en los tubos de órgano para producir el efecto llamado *vibrato*. Se usan para cada nota dos tubos afinados con frecuencias ligeramente diferentes.

El fenómeno de las pulsaciones puede demostrarse con dos diapasones montados como en la fig. 19G. Se hace que un diapason esté ligeramente desintonado con el otro, atándole fuertemente unas ligas de goma alrededor de las puntas. Si se hacen sonar directamente los dos diapasones, la intensidad del sonido sube y baja periódicamente. Esto se ilustra por medio de las gráficas de vibraciones de la figura 19H. La curva superior representa las vibraciones sonoras de un diapason que llegan al oído, y la segunda curva las vibraciones del otro. Las dos ondas llegan al oído, primero en fase, es decir, con el mismo paso una y otra, y luego fuera de fase; vuelven a estar en fase, otra vez fuera de fase, etc.

La acción resultante de estas dos ondas sobre el tímpano, es representada por la tercera línea. Cuando las ondas están en fase, la resultante tiene una amplitud grande igual a la suma de las amplitudes de las ondas. Cuando están fuera de fase, su amplitud disminuye hasta cero. El número de pulsaciones cada segundo, N , puede determinarse por la diferencia entre n_2 y n_1 , que son las frecuencias respectivas de las dos fuentes productoras de sonido.

frecuencia de pulsaciones

$$N = n_2 - n_1 \quad (19c)$$

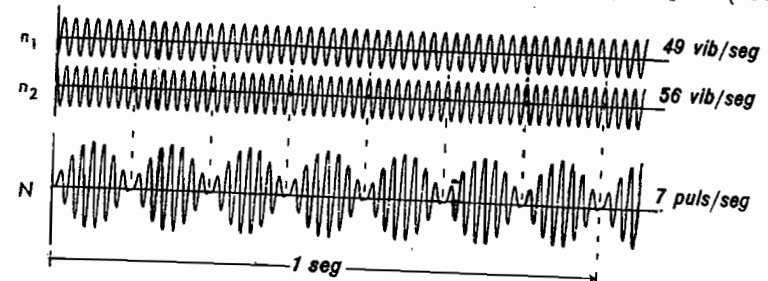


Fig. 19H. Las notas de pulsación son producidas por dos frecuencias diferentes.

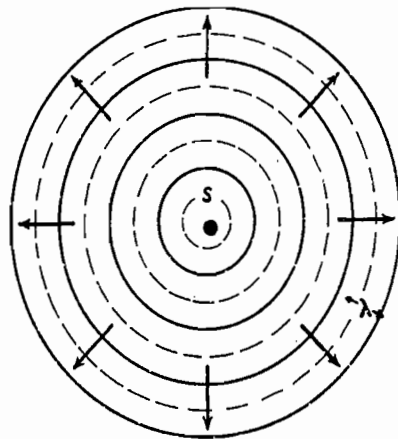


Fig. 19I. Ondas concéntricas extendiéndose desde una fuente única S.

Cuando la frecuencia de pulsaciones queda entre 1 y 6 vib/seg, el oído percibe un intertono que queda intermedio entre los dos sonidos, pero que periódicamente aumenta y disminuye de intensidad. Cuando la frecuencia de pulsaciones aumenta, el subir y bajar es reemplazado por una sucesión de impulsos, luego por una sensación de aspereza y, finalmente, por dos tonos que se perciben claramente separados.

19.8 Interferencia y ondas sonoras. Todos hemos tirado una piedra a un estan-

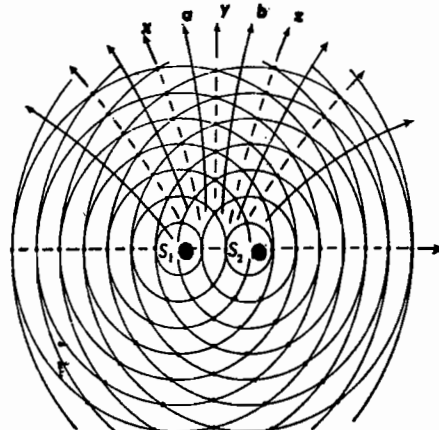


Fig. 19J. Ondas concéntricas saliendo de una fuente doble y produciendo un diagrama de interferencia.

que alguna vez y observado las ondas que se extienden en círculos crecientes. Estas ondas se representan con círculos concéntricos, como en la fig. 19I. Las líneas continuas representan las crestas de las ondas y, por tanto, están separadas una longitud de onda, mientras que las líneas punteadas representan los valles de las ondas y también están a una longitud de onda una de otra.

Si se tiran dos piedras simultáneamente al agua, se extienden dos juegos de ondas, como en la fig. 19J. Al cruzarse estas ondas unas con otras actúan entre sí produciendo lo que se llama un *diagrama de interferencia*. Donde se juntan las crestas de dos ondas en las intersecciones punteadas, se encuentran *en fase*, y se aumenta la elevación de la superficie del agua. Donde la cresta de una onda y el valle de la otra se reúnen, se encuentran *fuera de fase*, y la elevación de la superficie del agua se reduce. Las regiones en fase se



Fig. 19K. Fotografía de un tanque de ondas con la interferencia de las ondas de agua de dos fuentes. (Cortesía del Proyecto P.S.S.C.)

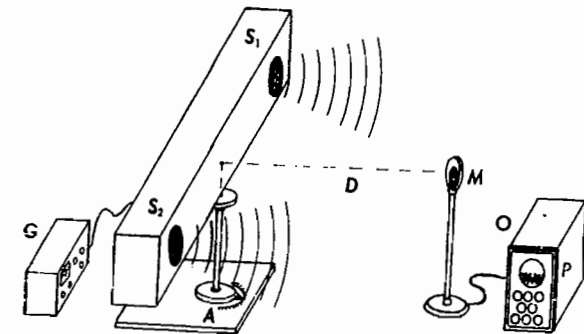


Fig. 19L. Experimento para demostrar la interferencia de las ondas sonoras de dos fuentes.

mueven hacia afuera a lo largo de las líneas punteadas como *x*, *y* y *z* y formando lo que se llama *interferencia constructiva*. Las regiones fuera de fase se mueven hacia afuera por las líneas continuas como *a* y *b* y ahí tenemos lo que se llama una *interferencia destructiva*.

Una fotografía instantánea de este diagrama de ondas se muestra en la fig. 19K. Nótese lo claramente que destacan las regiones de interferencia de las ondas. Las

fotos de este tipo, así como la observación directa de estos diagramas de ondas, pueden hacerse fácilmente como sigue: Se puede hacer un tanque que contenga agua poco profunda con un pedazo de vidrio de ventana y un marco de madera. Se usa como fuente una cinta delgada de metal fija por un extremo y puesta en vibración hacia arriba y abajo sobre el agua. Un trozo de alambre fijo a la punta vibrante de la cinta puede tener una punta tocando

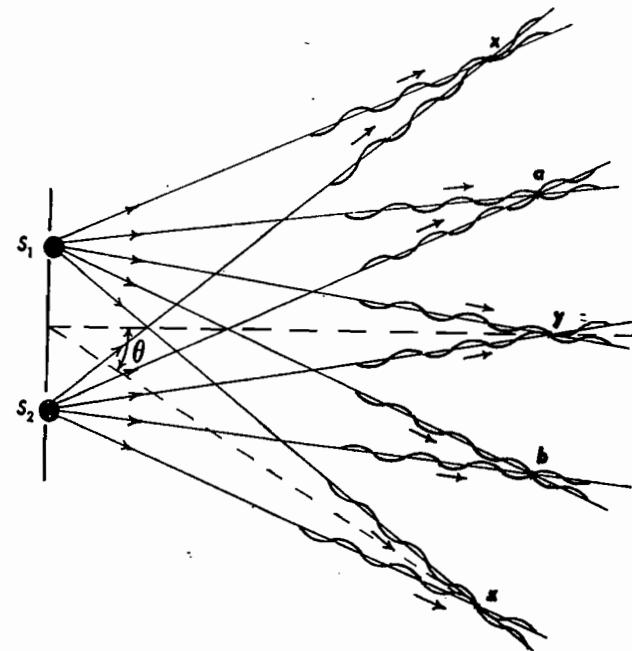


Fig. 19M. Diagrama que muestra los puntos donde las ondas llegan en fase y fuera de fase.

el agua para dar una fuente sola y con las dos puntas en el agua para dar una fuente doble. Viendo en forma intermitente las ondas a través de un disco ranurado, o iluminadas con una lámpara estroboscópica, puede uno hacer que el diagrama de ondas aparezca estacionario, o avance con movimiento retardado.

En la fig. 19L se muestra un experimento para demostrar la interferencia de ondas sonoras. Dos pequeños magnavoces de radio S_1 y S_2 se montan a unos 150 cm de separación en una caja hueca. La caja puede girar en torno a un eje vertical colocado a la mitad entre los centros de los magnavoces. Cuando los dos magnavoces son conectados a un generador sonoro electrónico, G , vibran en fase y mandan ondas idénticas al aire que los rodea. A unos dos metros de distancia, un micrófono, M , sirve como un excelente detector, y un osciloscopio conectado a él indicará las amplitudes relativas de las ondas sonoras resultantes que llegan a M . Al girar lentamente la caja en una dirección, la amplitud de las señales P del osciloscopio suben y bajan periódicamente indicando interferencias constructivas y destructivas. Al girarlo lentamente de regreso, se vuelven a observar máximos y mínimos en las mismas posiciones angulares.

Un diagrama instructivo, mostrando la llegada de pares de ondas al micrófono para las respuestas máximas y mínimas, se presenta en la fig. 19M. Los puntos x , y y z corresponden a los puntos x , y y z de la fig. 19J, donde las ondas llegan en fase, mientras que los puntos a y b corresponden a aquellos en que llegan fuera de fase.

Midiendo los ángulos en que se presenta la máxima respuesta en el experimento de la fig. 19L, así como la distancia entre

S_1 y S_2 y la distancia D , puede calcularse la longitud de onda de las ondas sonoras. En la fig. 19N se muestra esta relación geométrica.

Cuando la línea que une a las dos bocinas forma un ángulo recto con la perpendicular bisectriz D , las fuentes están equi-

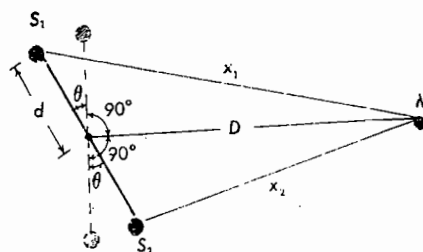


Fig. 19N. Relaciones geométricas para encontrar la longitud de onda de las ondas sonoras de una fuente doble.

distantes de M , las ondas llegan en fase y tenemos el punto y de las figs. 19J y 19M. Cuando las fuentes se giran a la posición z , la línea de los magnavoces se ha girado un ángulo θ , las ondas llegan de nuevo en fase; pero el camino x_1 es exactamente una longitud de onda más largo que el camino x_2 . Con un ángulo θ mayor, el camino x_1 puede hacerse exactamente dos longitudes de onda más largo que x_2 , y a un ángulo mayor aún se le pueden hacer tres longitudes de onda más largo, etc. Para todos estos ángulos especiales, donde las ondas están en fase, podemos escribir la misma ecuación

$$x_2 - x_1 = n\lambda \quad (19d)$$

donde

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Midiendo las distancias x_2 y x_1 para las diferentes posiciones de igualdad de fase, se puede calcular la longitud de onda de las ondas sonoras con la ec. (19d).

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Describir brevemente el fenómeno de la refracción de ondas sonoras. Dar un ejemplo y hacer un diagrama.

2. Hacer un diagrama del oído humano. Mostrar los tímpanos interno y externo; el martillo, yunque y estribo; la trompa de

Eustaquio; el caracol, los canales semicirculares y el pabellón.

3. Explicar y hacer un diagrama de un experimento con que pueda demostrarse la resonancia.

4. ¿Qué son las notas de pulsación? ¿Cómo se producen? Hacer un diagrama que muestre la forma de las ondas sonoras cuando se producen las pulsaciones.

5. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes elementos: a) tono; b) resonancia, y c) notas de pulsación.

6. Hacer un diagrama y explicar brevemente un experimento que pueda realizarse para demostrar que las ondas de sonido se transmiten en: a) gases; b) líquidos, y c) sólidos.

7. Encontrar la rapidez del sonido en el aire cuando la temperatura es de 30°C . (Resp. 349.3 m/seg.)

8. Si la temperatura del aire fuera de 24°C , ¿cuál será la rapidez del sonido en el aire?

9. Si la velocidad del sonido en el aire es de 1120 ft/seg, ¿cuál es la temperatura del aire en la escala Fahrenheit? (Resp. 62°F .)

10. Se observan los fuegos artificiales de un parque público desde una loma a 15 mi de distancia. Cuando estalla un cohete en el aire, ¿cuánto tardará en oírse el ruido después de haber visto las brillantes luces por primera vez? Considere que la luz se ve en el instante que estalla el cohete y que la temperatura del aire es de 92°F .

11. Un hombre fija unos rieles a los durmientes con clavos y da los martillazos con intervalos de 3 segundos. ¿Cuántos martillazos de atraso tendrá el sonido cuando llega a un observador que lo mira por un telescopio desde un punto a 2 mi de distancia? Considere la temperatura del aire a 111°F . (Resp. 3 martillazos.)

12. Calcular la rapidez del sonido en el aire en un día caluroso en que la temperatura es de 102°F .

13. Si un barco de guerra a 30 mi de la costa dispara sus cañones, ¿cuánto tardará el sonido en ser oído en la costa? Considere una temperatura de 84°F . (Resp. 2 min, 18 seg.)

14. ¿Cuánto tiempo después de ver la primera bocanada de humo de una locomotora que empieza a trabajar, oírás su ruido un observador desde una loma a un kilómetro de distancia? Considere una temperatura de 25°C .

15. Un observador militar ve un cañón enemigo en el momento de disparar. Observando su reloj determina que el intervalo de tiempo entre el relámpago luminoso y el sonido es de 10 seg. ¿Cuántas yardas de distancia debe reportar para dar la posición del cañón si la temperatura es de $68^\circ\text{Fahrenheit}$? (Resp. 3760 yd.)

16. Tres diapasones tienen frecuencias de 352, 495 y 528 vib/seg, respectivamente. Encontrar las frecuencias de las notas de pulsación que pueden producirse sonando los tres diapasones por pares.

17. Encontrar la rapidez del sonido en el aire al nivel del mar si la temperatura es de 0°F . (Resp. 1052 ft/seg.)

18. La rapidez del sonido en el aire en un día caliente resulta ser de 1190 ft/seg. Calcular la temperatura.

19. Dos cuerdas adyacentes de un piano tienen las frecuencias de 460.4 y 492.7 vib/seg, respectivamente. ¿Cuál es la frecuencia de la nota de pulsación que producen cuando se tocan simultáneamente? (Resp. 32.3 vib/seg.)

20. La rapidez del sonido en el aire en un día caluroso resulta ser de 1164 ft/seg. Calcular la temperatura.

21. Dos cuerdas vecinas en un piano tienen frecuencias de 392 y 440 vib/seg, respectivamente. ¿Cuál es la frecuencia de la nota de pulsación que producen cuando se tocan simultáneamente? (Resp. 48 vib/seg.)

22. Tres diapasones tienen frecuencias de 264, 358 y 440 vib/seg, respectivamente. En-

contrar las frecuencias de las notas de pulsación que pueden producirse sonando los diapasones por pares.

23. Encontrar la rapidez del sonido en el aire si la temperatura es de 54°C al nivel del mar. (Resp. 364 m/seg.)

24. Calcular la rapidez del sonido en el aire en un día caluroso cuando la temperatura es de 98°F .

25. Si un acorazado a 12 mi adentro del mar dispara sus cañones, ¿cuánto tardará el sonido en oírse en la costa? Considere una temperatura de 68°F . (Resp. 56.2 seg.)

20

INSTRUMENTOS MUSICALES

20.1 Instrumentos de cuerda. Hay dos razones principales para que los instrumentos de cuerda de diferentes tipos tengan sonidos distintos en lo que se refiere a la *calidad del tono*: primero, el tamaño y forma del instrumento, y segundo, la forma

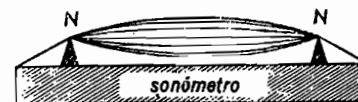


Fig. 20A. Una cuerda vibrando con su frecuencia fundamental.

en que se hacen vibrar las cuerdas. En el violín y el violoncello se hacen vibrar con arcos formados por cerdas estiradas fuertemente; en el arpa y la guitarra se hacen vibrar rasgueándolas con la uña, y en el piano las cuerdas son golpeadas con ligeros mazos de fieltro.

En condiciones muy especiales, se puede hacer que una cuerda vibre con nodos

en ambos extremos de la cuerda, como se ve en la fig. 20A. En esta forma de movimiento, la cuerda produce su nota más baja posible, y se dice que está vibrando con su *frecuencia fundamental*.

Todos los músicos saben que una cuerda gruesa y pesada tiene un tono natural más bajo que una cuerda delgada, que las cuerdas cortas tienen un tono más agudo que las cuerdas largas, y que, cuanto más tensa esté la cuerda, más agudo es su tono. La cuerda de *sol* de un violín, por ejemplo, es más gruesa y pesada que la cuerda más aguda de *mi*, y las cuerdas de los tonos *bajos* del piano, son más largas y más gruesas que las de los *agudos*.

20.2 Armónicos y sobretonos. Cuando un violinista profesional toca en *armónicos*, toca ligeramente las cuerdas en varios puntos y pone a vibrar cada una en dos o más segmentos, como se ilustra en la fi-

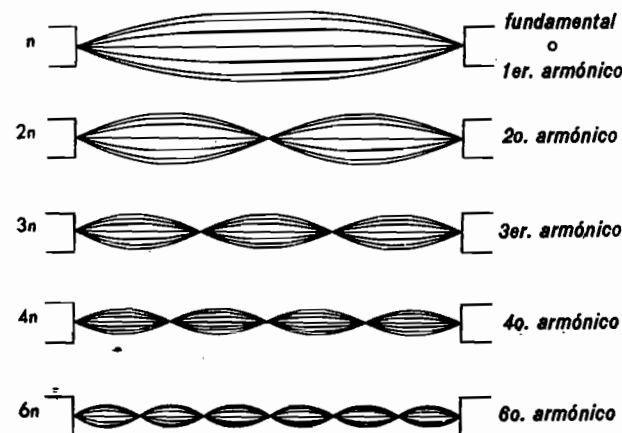


Fig. 20B. Modos de vibración de las cuerdas de los instrumentos musicales.

gura 20B. Si se toca una cuerda en el centro, se forma en ese punto un nodo y la frecuencia de la vibración se hace doble que la fundamental. Si se toca ligeramente una cuerda en un punto a un tercio de distancia de su extremo, vibrará en tres secciones y tendrá una frecuencia triple de la básica.

En la teoría elemental de los instrumentos de cuerda, se admite que las cuerdas son delgadas, uniformes, altamente flexibles y que vibran con amplitud pequeña entre dos soportes rígidos. Para esta cuerda ideal, los nodos de vibración mencionados antes, llamados *modos naturales*, tienen frecuencias exactamente iguales a los múltiplos enteros de la frecuencia fundamental n , y son llamados *armónicos*. Para hacer ver lo cercanas que están las cuerdas reales a estas condiciones ideales, se dan en la Tabla 20 A las frecuencias medidas en una cuerda de piano, cuya frecuencia fundamental es de 32.70 vib/seg.*

TABLA 20.A. FRECUENCIAS ARMÓNICAS DE UNA CUERDA DE PIANO

Modo número	1	2	3	4	5	6	7	8
Frec. media	32.70	65.52	98.39	131.4	164.7	198.4	232.4	266.8
Frec. armónica	32.70	65.40	98.10	130.8	163.5	196.2	228.9	261.6
Relación	1.000	2.003	3.008	4.018	5.038	6.066	7.106	8.159

No es difícil hacer que una cuerda vibre con su tono fundamental y con varios sobretonos al mismo tiempo. Esto se logra rasgueándola o frotándola con el arco vigorosamente. La fig. 20C ilustra un dia-



Fig. 20C. Cuerda vibrando simultáneamente con su frecuencia fundamental y el primer sobretono.

grama de una cuerda ideal vibrando en dos formas normales al mismo tiempo. Conforme la cuerda vibra en dos tramos

con frecuencia $2n$, también se mueve hacia arriba y abajo como un solo tramo, con la frecuencia fundamental n .

La onda sonora producida por esta cuerda vibrante, está compuesta de dos frecuencias, la fundamental o primer armónico de frecuencia n , y el segundo armónico o primer sobretono con frecuencia $2n$.

En la fig. 20D se ilustra un interesante experimento hecho con cuerdas vibrantes. La luz de una lámpara de arco es enfocada en la sección central de una cuerda de acero tensada, que, salvo por una pequeña ranura vertical, queda cubierta por una pantalla. Mediante un segundo lente, se enfoca una imagen de la ranura y de la sección visible de la cuerda, que se proyecta sobre una pantalla después de reflejarla sobre un espejo giratorio. Conforme vibra la cuerda hacia arriba y hacia abajo, sólo se ve una imagen borrosa de la sección de la cuerda; pero cuando se hace girar el espejo, dicha sección traza claramente una curva visible, W .

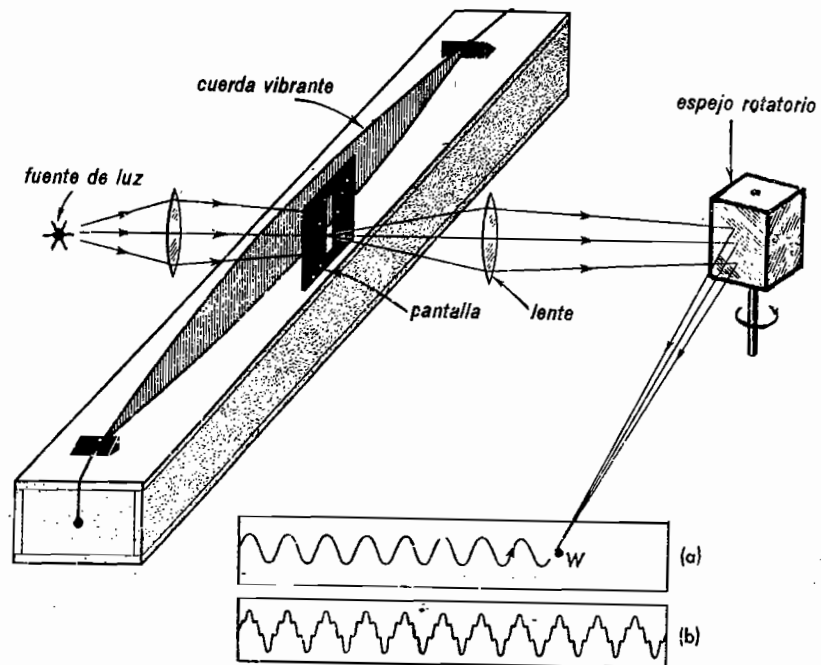


Fig. 20D. Observación detallada de las vibraciones de una cuerda estirada.

te como instrumentos de viento o de aliento se dividen generalmente en dos subclases, de madera y de latón. Entre los primeros, encontramos instrumentos como la flauta, el flautín, el clarinete, el clarinete bajo, el saxófono, el fagot y el contrafagot, y entre los segundos, encontramos el corno, la corneta, la trompeta, el trombón tenor, el trombón bajo y la tuba.

En la fig. 20E se indica un experimento en que se demuestran los principios fundamentales que intervienen en la vibración de una columna de aire. Se usa un diapason como fuente productora de ondas sonoras y se sostiene frente a la boca abierta de un tubo hueco largo que contiene agua. Al avanzar hacia abajo por el tubo con la velocidad del sonido, cada tren de ondas es reflejado en la superficie del agua, regresando luego hasta arriba. Si se sube o baja el agua hasta un nivel apropiado, se producirán ondas estacionarias en la columna de aire, al establecerse resonancia

con la frecuencia del sonido producido por el diapason.

La primera resonancia se presenta en N_1 , cuando el nivel del agua está a muy corta distancia de la boca del tubo. La segunda resonancia se presenta en N_2 , a una distancia de la boca del tubo tres veces mayor que N_1 , y la tercera resonancia viene en N_3 , que está a 5 veces la distancia de N_1 , etc. La razón de estas fracciones impares, es que en el extremo cerrado del tubo sólo se pueden formar nodos, es decir, en la superficie del agua, mientras que en la boca abierta del tubo se forman antinodos.

Las ondas estacionarias en el aire tienen naturaleza longitudinal, y son difíciles de representar con dibujos (véase la fig. 181). Por pura conveniencia, es muy común indicar las posiciones de los nodos y los antinodos, como si fueran ondas transversales estacionarias (líneas punteadas en el diagrama). Si se conoce la frecuencia del

* Ver R. W. Young, *American Journal of Physics*, vol. 20, pág. 177, 1952.

20.3 Instrumentos de viento. Los instrumentos musicales clasificados frecuentemen-

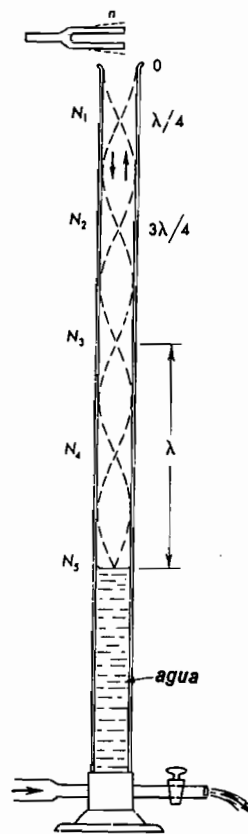


Fig. 20E. Las ondas sonoras de un diapason producen ondas estacionarias en una columna de aire ajustadas a una longitud apropiada.

diapasón usado en el experimento anterior, puede calcularse la velocidad del sonido en el aire. La distancia entre dos nodos consecutivos es igual a media longitud de onda, así que λ es igual a la longitud de 2 segmentos $N_3 - N_1$, $N_4 - N_2$ o $N_5 - N_3$, como se indica en el diagrama. En un experimento real, en que la temperatura es de 27°C y el diapason produce 512 vib/seg, los nodos están separados una distancia de 33.8 cm. Sustituyendo estos valores en la ecuación de la onda (18c), nos da

$$V = n\lambda = 512 \times 67.6 = 34,611 \text{ cm/seg}$$

Dividiendo entre 110, da

$$V = 346.11 \text{ m/seg.}$$

FÍSICA DESCRIPTIVA

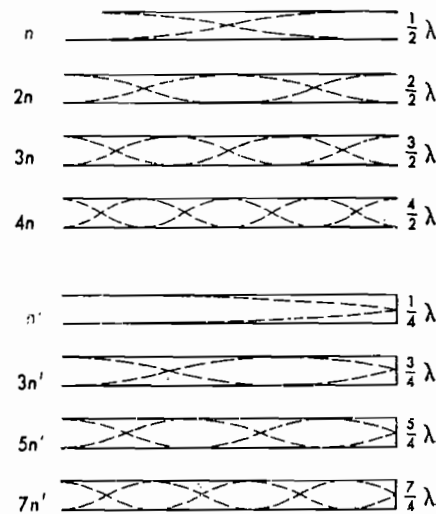


Fig. 20F. Columnas de aire resonantes, mostrando los nodos y antinodos.

20.4 Columnas vibrantes de aire. En la fig. 20F se ven los modos en que pueden vibrar las columnas de aire de tubos cerrados o abiertos. Empezando por la izquierda, el tubo abierto por los dos extremos puede vibrar con: 1) un solo nodo en medio y un antinodo en cada extremo; 2) dos nodos y tres antinodos, o 3) con tres nodos y cuatro antinodos, etc. Por otra parte, un tubo cerrado en un extremo y abierto en el otro, puede vibrar con: 1) un nodo y un antinodo; 2) dos nodos y dos antinodos, o 3) tres nodos y tres antinodos, etc. En todas las columnas vibrantes de aire debe formarse siempre un antinodo en los extremos abiertos y un nodo en los extremos cerrados.

Las frecuencias con que puede resonar un tubo son de valores definidos y fijos, dependiendo sólo de la longitud del tubo y de la velocidad del sonido en el aire. Si, por ejemplo, los tubos de la fig. 20F son todos de 60 cm de largo y el sonido en el aire tiene una velocidad de 336 m/seg, la ecuación (18c), $V = n\lambda$, nos dice que vibrará con las siguientes frecuencias:

n	$2n$	$3n$	n'	$3n'$	$5n'$
280	560	840	140	420	700

INSTRUMENTOS MUSICALES

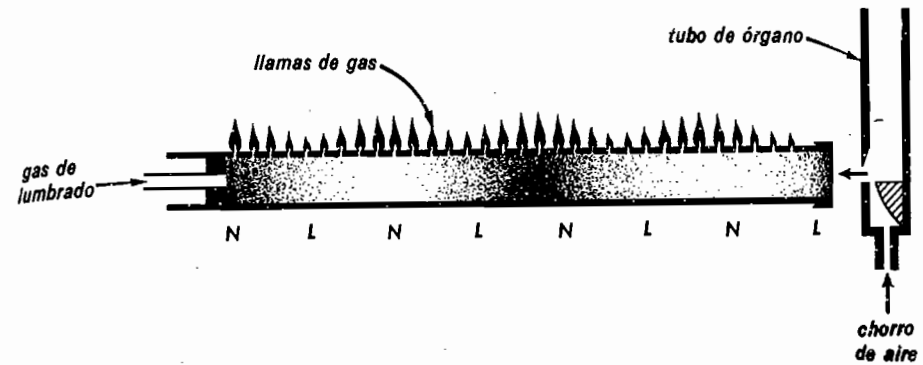


Fig. 20G. Ondas estacionarias en un tubo lleno de gas combustible.

Con un tubo abierto, la frecuencia más baja posible recibe el nombre de *fundamental*, y las otras, con frecuencias múltiples enteras de la frecuencia fundamental, $2n$, $3n$, $4n$, etc., son llamadas *armónicos*. Con los tubos cerrados, la más baja frecuencia es de nuevo la fundamental y las otras con frecuencias múltiples enteros impares, $3n'$, $5n'$, $7n'$, etc., son los armónicos. Todas estas formas de vibración se consideran *formas naturales de vibración*, y sus frecuencias correspondientes son las frecuencias naturales. Al tono fundamental también se le llama *primer armónico*.

Se puede demostrar la existencia de ondas estacionarias en una columna resonante de aire, mediante un tubo hueco largo alimentado con gas combustible, como se ve en la fig. 20G, como un mechero múltiple. El gas que entra atravesando un pistón por el lado izquierdo, sale por los pequeños agujeros espaciados a intervalos regulares, perforados en la parte superior del tubo. Las ondas sonoras de un tubo de órgano actúan a la columna de gas poniendo antes en vibración una hoja de papel delgado colocada estirada sobre el extremo derecho. Cuando se logra la resonancia al colocar el pistón movable en una posición conveniente, las pequeñas llamas del gas presentarán la distribución ilustrada en la figura. Donde se presentan nodos en la columna vibrante de gas, las moléculas de gas no se mueven (véase la fig. 181 (b)); en estos puntos la presión es

grande y las llamas son más altas. A la mitad entre estos puntos están los antinodos, regiones donde las moléculas vibran para atrás y adelante con amplitudes grandes, y las llamas son bajas. El principio de Bernoulli, es el principal motivo por el cual se producen diferencias de presión (véase la Sección 14.6), ya que donde la velocidad de las moléculas es grande, la presión es pequeña, y donde la velocidad es baja, la presión es elevada.

En muchos de los instrumentos de viento de las orquestas, no son del todo uniformes las columnas vibrantes de aire, y el extremo abierto está considerablemente acampanado. Debido a esta irregularidad, los nodos no están espaciados uniformemente, las frecuencias posibles no son ar-

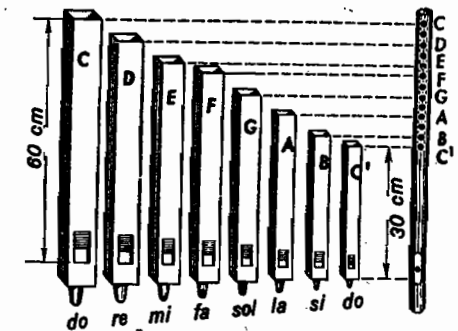


Fig. 20H. Tubos de órgano formando la escala musical. A tubo más largo, frecuencia y tono más bajos. La columna vibrante de aire en la flauta se corta en varios puntos por las aberturas a lo largo del tubo.

mónicos exactos del fundamental. Como ilustración de lo cercanos que son los valores de los nodos normales de vibración a los verdaderos armónicos de una nota fundamental, se dan en la Tabla 20B las frecuencias medias de las *notas abiertas*

TABLA 20B. FRECUENCIAS ARMÓNICAS DE UNA CORNETA

Modo número	2	3	4	5	6	8
Frec. media	233.4	349.9	467.5	587.7	706.2	498.6
Frec. armónica	233.4	350.1	466.8	583.5	700.2	933.6
Relación	2.000	2.998	4.007	5.037	6.058	8.130

Las notas abiertas son aquellas para las que todas las válvulas se dejan abiertas y vibra toda la columna de aire.

20.5 Teoría de las columnas vibrantes de aire. Las notas producidas por la mayoría de los instrumentos de viento, se logran variando la longitud de la columna vibrante de aire. Esto se ilustra con los tubos de órgano de la figura 20H. Cuanto más largo es el tubo, más baja es la frecuencia fundamental o el tono de la nota. En un órgano de concierto regular, los tubos varían de longitud desde unos 15 cm para las notas más agudas, hasta 4.85 metros para las más graves. Para la octava media de la escala musical, los tubos de boca abierta varían de 60 cm para el do, hasta 30 cm para el do una octava más alto. En los instrumentos de madera, como la flauta, la longitud de la columna se varía con orificios que tiene a lo largo; y en muchos de los de latón, como la trompeta, se usan válvulas. Una válvula es un pistón que agrega una longitud adicional al tubo cuando se la presiona.

20.6 Tonos de bordes vibrantes. Aunque el tono de la nota producida por cualquier instrumento de viento es determinada por la vibración de una columna de aire, de acuerdo con los principios de la resonancia, el método seguido para producir dicha vibración varía notablemente de un instrumento a otro. En los instrumentos del

tipo del saxófono o clarinete, oboe y fagot, se sopla el aire contra una laminilla delgada de madera, llamada lengüeta, haciéndola vibrar. En la mayoría de los instrumentos de latón los labios del músico se hacen vibrar con la frecuencia neces-

aria, mientras que en algunos de madera del tipo de la flauta y el flautín, y los tubos de órgano y silbatos, el aire se sopla contra el filo de una abertura cercana a un extremo del instrumento, haciendo que el aire vibre. Por eso es importante hacer aquí una breve discusión de estas fuentes de vibración.

Cuando el viento o una corriente de aire encuentran un obstáculo pequeño, se forman pequeños remolinos en la corriente de aire detrás del obstáculo. Esto se ilustra en la fig. 20I con la sección transversal de un tubo de órgano. Lo mismo si el obstáculo es un objeto alargado como si es pequeño y redondo, los remolinos se forman alternados en los dos lados como se muestra. La corriente de aire en B, oscila hacia atrás y hacia adelante mandando impulsos de aire, primero por un lado y después por el otro. Aunque el aire sople a través de la abertura A como una corriente continua, los remolinos separados que van subiendo a uno y otro lado del obstáculo, producen golpes periódicos sobre el aire que los rodea. Estos impulsos que se producen a intervalos perfectamente regulares, producen una nota musical.

El número de remolinos formados cada segundo, y, por tanto, el tono de la nota producida aumenta con la velocidad del aire. Cuando éste sopla entre los árboles, el tono de las notas producidas sube y baja, dependiendo su frecuencia de la velocidad del mismo, los objetos más peque-

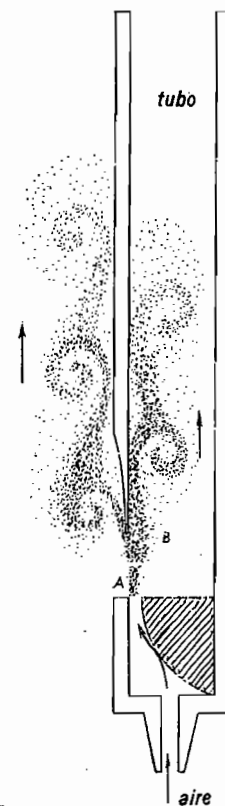


Fig. 20I. Una corriente continua de aire que da en el labio de un tubo de órgano, produce remolinos en los dos lados del obstáculo.

ños producen notas más agudas. Un alambre o una liga de goma estirada puesta en una ventana abierta o en medio del viento, vibra y produce una nota musical. Cada remolino del aire produce una reacción del obstáculo (el alambre o la liga de goma), empujándolo primero hacia un lado y después hacia el otro. Estos empujones son los que hacen que la cuerda del asta de una bandera golpee periódicamente con la brisa, y las ondulaciones de la bandera arriba nos hacen ver los remolinos que se suceden alternativamente a cada lado.

La columna de aire, dentro de un tubo de órgano, flauta o flautín, tiene su propia frecuencia natural de vibración, que puede

coincidir, o no, con la frecuencia de la nota producida en el borde. Si coincide, se produce resonancia, y la columna de aire vibra con una gran amplitud y los impulsos de aire que regresan por dentro del tubo con cada vibración, fuerzan a la corriente de aire hacia afuera en el momento apropiado, ayudando a reforzar la frecuencia natural del tubo. Si el tono producido por la vibración en el borde tiene una frecuencia diferente de la fundamental de la columna de aire, se producen vibraciones pero no son tan intensas como antes. Si, por ejemplo, la nota producida en la entrada del tubo de órgano se acerca al doble de la fundamental del tubo, y se puede obtener esta nota por una corriente de aire más fuerte, el tubo resonará con frecuencia doble de su fundamental y producirá una nota intensa y una octava más aguda.

Soplando más fuerte en la boca de un flautín o flauta, se puede subir toda la escala de notas una octava por encima del nivel en que toca normalmente el instrumento. En todos los instrumentos mencionados arriba, donde se sopla aire a través del borde agudo de una abertura para hacerlos sonar se forma un antinodo en ese extremo, igual que en el tubo de órgano de la fig. 20I. En el otro extremo se producirá un antinodo o un nodo, dependiendo de que esté abierto o cerrado.

20.7 Instrumentos de percusión. Barras vibrantes. Si se dejan caer sobre el suelo varios pedazos de madera, se produce un sonido que se describe como ruido. Si se deja caer un solo pedazo de madera, el sonido se aprecia también como ruido, a menos que se escojan pedazos de madera de longitud apropiada y se dejen caer en un orden conveniente. Si se hace esto, se observa que cada pedazo de madera produce una nota bien definida y que pueden seleccionarse los pedazos de manera que formen una escala musical. El uso de las varillas vibrantes en un instrumento de música, se encuentra en el *xilófono*, la *marimba* y el *triángulo*. Se pueden producir

ondas estacionarias en las barras, al igual que en las cuerdas tensas, y pueden ser de tres clases: transversales, longitudinales o de torsión. Sólo trataremos ahora de los dos primeros modos de vibración.

Las ondas transversales de una barra vibrante, generalmente se producen sosteniendo la barra en puntos cercanos a sus extremos y golpeándola cerca del centro. Como se ve en la fig. 20J (a), el centro y los extremos de la barra se mueven para

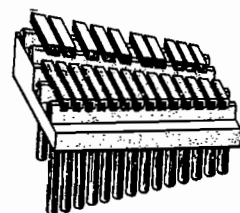


Fig. 20J. (a) Vibraciones transversales de una barra uniforme. (b) Diagrama de las barras y tubos de una marimba.

arriba y para abajo, formando nodos en los dos soportes. Cuanto más corta es la barra, más agudo es el tono; y cuanto más larga y pesada es la barra, más baja es la frecuencia de vibración y el tono producido, tal como ocurre en las cuerdas.

El xilófono es un instrumento musical basado en las vibraciones transversales de las barras de madera de diferentes longitudes. Montadas como se ilustra en la figura 20J (b), las barras más largas producen las notas graves y las barras más cortas producen las notas agudas. La marimba es esencialmente un xilófono con un tubo largo y hueco suspendido verticalmente debajo de cada barra. Cada tubo se corta de tal longitud que la columna

de aire encerrada esté en resonancia con las ondas sonoras producidas por la barra por la barra que tiene encima. Cada tubo resonador, abierto en los dos extremos, forma un nodo en su centro.

El diapason produce sonidos cuyo tono depende de las vibraciones transversales de una barra. Cuando produce un tono fundamental, como se ilustra en la figura 20K, forma antinodos en los dos extre-

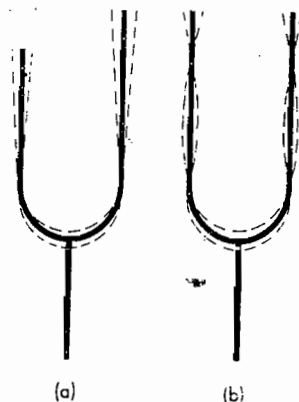


Fig. 20K. Los nodos de la vibración de un diapason produciendo (a) el tono fundamental y (b) el primer sobretono.

mos. Debido al doblez del centro, los dos nodos están más cerca entre sí que en una barra recta, y el antinodo del centro transmite a través del mango vibraciones forzadas de pequeña amplitud a cualquier superficie en que se apoye.

20.8 Placas vibrantes. Aunque es difícil considerar como instrumentos musicales al tambor y a los címbalos (platillos), se les clasifica como tales y se les usa en casi todas las orquestas y bandas importantes. El ruido producido por el cuero de un tambor o los platillos de un címbalo, es debido en general a la alta intensidad de ciertos sobretonos característicos. Estos sobretonos se deben a su vez a las formas muy complicadas en que vibra la fuente del sonido.

Los címbalos consisten en dos discos metálicos delgados, con agarraderas en sus

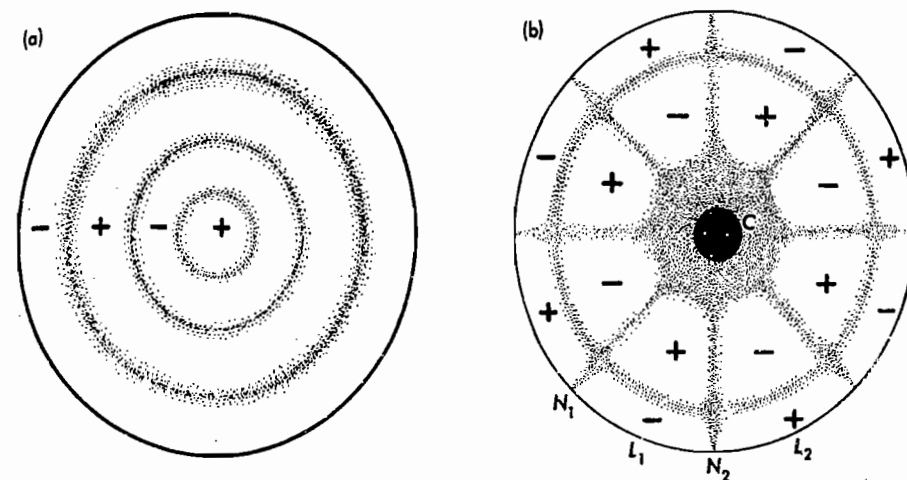


Fig. 20L. Las figuras de arena de Chladni, señalan los nodos y antinodos de, (a) un tambor (fijo por los bordes) y de, (b) un platillo de címbalo (fijo por el centro).

centros. Cuando se golpean uno contra otro, vibran sus bordes con un chasquido. Por otra parte, el cuero del tambor es una membrana tensa de cuero, que se mantiene fija en la periferia, y que se hace vibrar golpeándola en el centro o cerca de él.

Para ilustrar la complejidad de las vibraciones de una placa circular se presentan en la fig. 20M dos diseños típicos producidos con arena. El método de diseños con arena para el estudio de los movimientos de las placas, fue inventado en el siglo xviii por Chladni, un físico alemán. Se

fija una placa metálica circular por el centro, C , y su cara superior se rocía con arena. Después, mientras se detiene el borde de la placa en dos puntos, N_1 y N_2 , se frota el borde con un arco de violoncelo en el punto L . Se forman nodos en los puntos estacionarios N_1 y N_2 y antinodos en las regiones sin movimiento. En un instante dado, las regiones marcadas con (+) se mueven todas hacia arriba, mientras que las regiones marcadas con (-) se mueven hacia abajo. Media vibración más tarde, las regiones (+) se mueven hacia abajo y las regiones (-) hacia arriba.

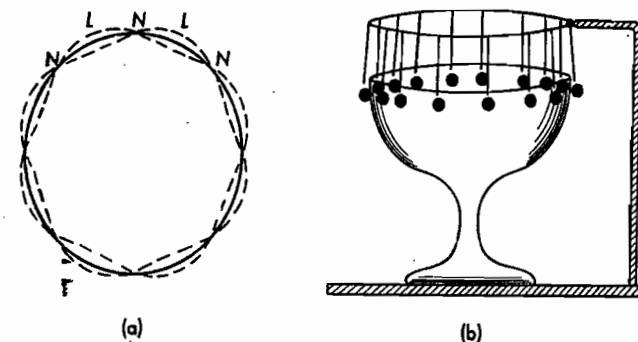


Fig. 20M. El borde de una campana o una copa vibra produciendo nodos y antinodos.

ba. Estos diagramas son llamados *figuras de arena de Chladni*.

A los platillos del címbalo fijos firmemente por el centro mediante su mango, se les forma siempre allí un nodo y en la periferia los antinodos. Por su parte, el tambor siempre forma en la periferia un nodo y en el centro a veces, aunque no siempre, un antinodo.

20.9 Campanas. Las campanas son en ciertos aspectos como los platillos del címbalo, porque son golpeados con el badojo; se hace vibrar principalmente su borde, con nodos y antinodos distribuidos en una forma simétrica en toda la superficie. La vibración del borde se expone en la figura 20M (a) y el experimento es presen-

tado en (b). Se cuelgan esferillas de corcho alrededor del borde de una copa grande de vidrio, tocándolo apenas. Se frota un arco de violín contra dicho borde, lo cual hace que éste vibre con sus nodos y antinodos en determinados puntos de la periferia. Los nodos siempre se presentan en número par, como ocurre en los platillos del címbalo y en el tambor, y los antinodos se mueven alternativamente hacia dentro y hacia afuera.

Estrictamente hablando, la campana no es un instrumento muy musical. Esto se debe a que las vibraciones de la superficie de la campana son muy complejas, produciendo muchos sobretonos intensos. Algunos de estos últimos son armónicos del fundamental, pero otros no lo son.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuántas frecuencias naturales de vibración puede tener una sola cuerda? ¿Cómo se les llama? ¿Cómo están relacionadas esas frecuencias?

2. ¿Cómo se producen diferentes notas de la escala musical? ¿Cuál es la frecuencia más baja de una cuerda?

3. ¿Cuáles son los tres factores de que depende la frecuencia de una cuerda? Escribir la ecuación.

4. Hacer un diagrama de una cuerda vibrando con: a) su 7º armónico; b) su 12º armónico y su 1º y 4º armónicos simultáneamente.

5. Hacer un diagrama que muestre la columna de aire vibrante de un tubo cerrado solamente por un extremo y produciendo: a) su 2º armónico y b) su 7º armónico; c) ¿Qué clase de ondas son?

6. Hacer un diagrama de un tubo recto abierto por los dos extremos y vibrando con: a) su tono fundamental; b) su 4º armónico, y c) su 7º armónico.

7. ¿Qué son los tonos de bordes vibrantes? Explique con ayuda de un diagrama.

8. Hacer un diagrama mostrando una barra de xilófono vibrando con su 3º armónico. ¿Qué clase de ondas son?

9. ¿Cuáles son las diferencias entre las cuerdas agudas y bajas de un piano? ¿Por qué las cuerdas bajas se ven como resortes espirales?

10. ¿Qué clase de ondas intervienen en los instrumentos de viento? ¿Qué formas diferentes han de poner en movimiento las columnas de aire en los instrumentos de viento?

11. La frecuencia fundamental de un clarín es de 66 vib/seg. Todas las demás notas producidas en este instrumento son armónicos superiores de esta frecuencia. Encontrar las frecuencias de 2º, 3º, 4º, 5º y 6º armónico. (Resp. 132, 198, 264, 330 y 396 vib/seg.)

12. La nota más baja de un flautín tiene una frecuencia fundamental de 528 vib/seg. Encontrar las frecuencias del 2º, 3º y 4º armónico de esta nota.

13. Se efectúa un experimento como el de la fig. 20E con un diapasón que tiene una frecuencia de 660 vib/seg. Si los nodos se encuentran a 26.6 cm de separación, ¿cuál

es la rapidez del sonido? (Resp. 351.1 metros por segundo.)

14. La cuerda de un violín tiene una frecuencia de 440 vib/seg. Calcular la frecuencia de esta cuerda cuando está produciendo: a) su 3º armónico; b) su 6º armónico, y c) su 10º armónico.

15. Una cuerda de piano tiene una frecuencia fundamental de 264 vib/seg. Encontrar la frecuencia de vibración de esta cuerda cuando produce: a) su 3º armónico; b) su 7º armónico, y c) su 11º armónico. (Resp. a) 792 vib/seg; b) 1848 vib/seg, y c) 2904 vib/seg.)

16. Una de las cuerdas de un instrumento musical tiene una frecuencia fundamental de 395 vib/seg, y tiene 32 cm de largo. Encontrar la rapidez de las ondas en esta cuerda cuando está vibrando con: a) su 1º armónico, y b) su 2º armónico.

17. Las cuerdas que producen cierta nota en un piano son de 90 cm de largo y tienen una frecuencia de 198 vib/seg. ¿Cuál es la rapidez de las ondas en esta cuerda? (Resp. 356 m/seg.)

18. Un órgano muy grande tiene un tubo de 16 ft de largo. ¿Cuál es la frecuencia fundamental de este tubo a 78º F? Considere que el tubo está abierto por los dos extremos.

19. Si la cuerda de piano, usada en las mediciones dadas en la Tabla 20A, tiene una longitud de 95 cm, ¿cuál es la velocidad de las ondas a lo largo de esta cuerda? (Resp. 62.1 m/seg.)

20. La nota musical do³ de un piano tiene una longitud de sólo 8.2 cm y una frecuencia fundamental de 2093 vib/seg. Encontrar la rapidez de las ondas en esta cuerda cuando vibra con su frecuencia fundamental.

21. Usando un diapasón con frecuencia de 264 vib/seg, los nodos formados en una columna de aire (ver la fig. 20E) se encuentran a 25.4 in de distancia. Calcular la rapidez del sonido. (Resp. 1118 ft/seg.)

22. De la densidad del gas dióxido de carbono (CO₂) de la Tabla 13A, calcular la rapidez del sonido en este gas. Considere el gas a una presión normal.

REFLEXION, REFRACCION Y DISPERSION DE LA LUZ

Todas las propiedades conocidas de la luz pueden describirse convenientemente mediante los experimentos que sirvieron para descubrirlas y las muchas y variadas experiencias con que ahora corrientemente se demuestran. Siendo muy numerosas estas últimas, se pueden agrupar y clasificar en las tres secciones siguientes: 1) *óptica geométrica*, 2) *óptica física* y 3) *óptica cuántica*. Cada una de ellas se puede subdividir como sigue:

Óptica geométrica	Óptica física	Óptica cuántica
reflexión	difracción	efecto foto-eléctrico
refracción	interferencia	efecto Compton
dispersión	polarización	producción de pares

La primera sección, la óptica geométrica, se tratará en este capítulo.

21.1 Las leyes de la reflexión. Experimentalmente, se demuestra que siempre que un rayo de luz se refleja en una superficie plana, la naturaleza de la luz reflejada puede describirse con leyes simples y bien definidas. La más simple de estas leyes es conocida como *ley de la reflexión*. Conforme a esta ley, el ángulo con que cae el rayo de luz sobre la superficie reflectora, es exactamente igual al ángulo que forma el rayo reflejado con la misma superficie. En lugar de medir el *ángulo de incidencia* y el *ángulo de reflexión* a partir de la superficie del espejo, se acostumbra a medirlos desde una línea perpendicular a la superficie del espejo. Esta línea se llama la *normal* (fig. 21A). Conforme aumenta el ángulo i , el ángulo i'

tumbra a medirlos desde una línea perpendicular a la superficie del espejo. Esta línea se llama la *normal* (fig. 21A). Conforme aumenta el ángulo i , el ángulo i'

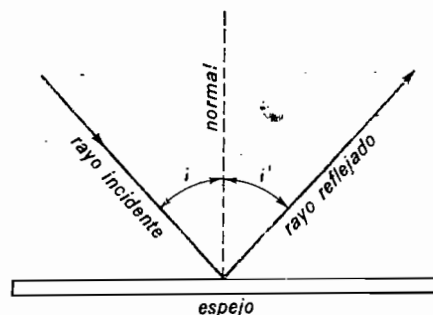


Fig. 21A. Ley de la reflexión en un espejo plano.

aumenta justamente en la misma cantidad, así que para todos los ángulos de incidencia,

$$\text{ángulo } i = \text{ángulo } i'$$

La segunda parte de esta ley establece que el rayo reflejado está dentro del plano de incidencia, definiéndose este plano como el que contiene el rayo incidente y a la normal. En otras palabras, *el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado, están todos contenidos en un mismo plano.*

Al hablar de la superficie de un espejo, no siempre se trata de una placa plateada de vidrio; un espejo puede ser cualquier superficie suficientemente tersa para producir reflexión regular como se acaba de describir.

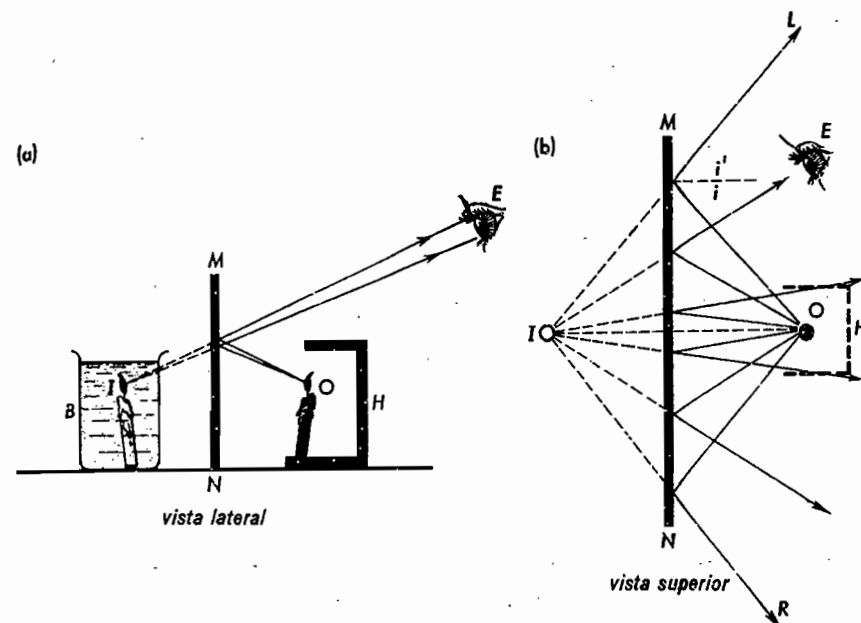


Fig. 21B. Reflexión en un espejo o una placa de vidrio. La luz de la llama O parece venir de I.

21.2 Imagen formada en un espejo plano. La imagen de uno mismo vista en un espejo, se forma por los rayos de luz que avanzan en línea recta y son reflejados conforme a las leyes de la reflexión. Todos los objetos vistos en un espejo plano, son imágenes formadas por reflexión. Esto puede demostrarse con el experimento de la fig. 21B. (a). Se coloca una vela encendida O, sobre la mesa y cerca de la placa de vidrio MN. Teniendo la vela escondida detrás de la caja H, el observador colocado en E, ve solamente la imagen reflejada en I. Si se coloca un vaso con agua, B, la imagen parece tan real como si la vela estuviera ardiendo dentro del agua.

Como se señala en la vista desde arriba, (b), todos los rayos de luz que salen de la fuente O, son reflejados conforme a las leyes de la reflexión. Para un observador que esté en cualquier punto entre L y R, en el lado derecho del espejo, toda la luz parece venir del punto I. Este punto imagen está detrás del espejo a la misma distancia que el objeto O por delante del

espejo, estando los dos situados en una misma perpendicular al espejo.

La imagen que uno ve en un espejo plano, no es una imagen real, sino virtual. Una imagen virtual es aquella de donde parecen proceder los rayos de luz, pero que en realidad no vienen de ella. En la figura, los rayos no vienen de I; vienen de O y, por reflexión, llegan hasta el observador.

Este experimento ilustra un truco usado para hacer aparecer figuras fantásticas moviéndose en un cuarto o en el escenario de un teatro. La luz, que viene de las personas y objetos reales colocados más abajo o más arriba que el escenario, se refleja en una placa grande de vidrio que cubre el frente de la escena. Usando cortinas apropiadas y oscureciendo el salón, se puede obtener una ilusión muy efectiva.

Si uno ve su propia cara en un espejo plano, la imagen que observa se describe técnicamente como *falseada* (contraria). La imagen viene a ser como si la cara se hubiera reproducido en una máscara de

goma, se volviera a la parte interior de la máscara hacia afuera y se viera desde su nuevo frente. La oreja derecha del sujeto se convierte en la izquierda de la imagen y la izquierda en la derecha.

Para que uno vea su propia cara como la ven los demás, se deben colocar dos espejos formando un ángulo de 90° y unidos por una arista, como se ve en la fig. 21C. La oreja derecha del observador será vista, entonces, como la oreja derecha de su imagen, debido a las dos reflexiones sucesivas. Este experimento puede realizar-

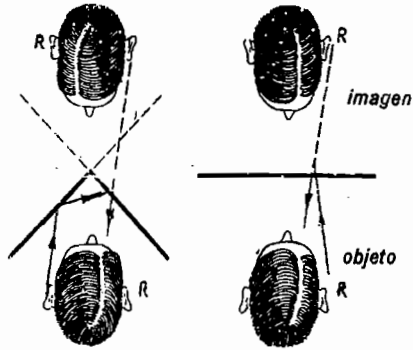


Fig. 21C. La imagen del observador vista en dos espejos a 90° es normal; vista en un espejo plano está falseada.

se para comprobar que las caras de muchas personas, sin saberlo ellas, son ligeramente asimétricas. Estas irregularidades se invierten al verse en los espejos a 90° , y aparecen de doble magnitud y son por tanto muy fáciles de apreciar.

21.3 La velocidad de la luz. En el vacío, o en el espacio interestelar, la luz viaja con una velocidad de 299 790 km/seg (186 300 mi/seg). Para la mayoría de los cálculos prácticos, se redondea este número como sigue:

$$\text{velocidad de la luz} = 300\,000 \text{ km/seg}$$

En un medio transparente, como aire, vidrio o agua, la luz viaja a velocidades algo menores. Por ejemplo, en el agua, la velocidad de la luz, v , es de 225 000 km/seg, las tres cuartas partes de su ve-

locidad en el vacío, mientras que en el vidrio común, su velocidad es cercana a 200 000 km/seg.

21.4 El índice de refracción. La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en un medio se llama el índice de refracción de dicho medio.

$$\frac{\text{velocidad de la luz en el vacío}}{\text{velocidad de la luz en un medio}} = \text{índice de refracción}$$

En símbolos,

$$\frac{c}{v} = \mu \quad (21b)$$

Se usa frecuentemente la letra griega μ (mu) para representar esta relación. Se pueden calcular los siguientes índices de refracción, sustituyendo en esta fórmula las velocidades dadas en la sección anterior:

$$\text{para agua, } \mu = 1.33 \quad (21c)$$

$$\text{para vidrio, } \mu = 1.5 \quad (21d)$$

$$\text{para aire, } \mu = 1.00 \quad (21e)$$

Las medidas muy exactas del índice de refracción del aire, dan un valor de 1.0029.

21.5 Refracción. Cuando la luz cae sobre la superficie tersa de una sustancia transparente, como el agua o el vidrio fuera de la dirección perpendicular, parte de

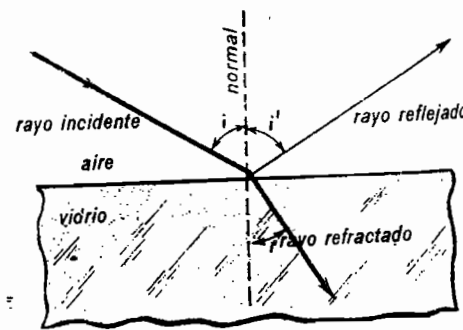


Fig. 21D. La reflexión y refracción de la luz en la superficie de una placa de vidrio.

ella se refleja de acuerdo con las leyes de la reflexión, y el resto es refractada entrando al nuevo medio (como en la figura 21D). Esta desviación se debe al cambio de la velocidad de la luz al entrar al segundo medio. La dirección del rayo refractado se mide siempre tomando el ángulo que forma con la normal, como se

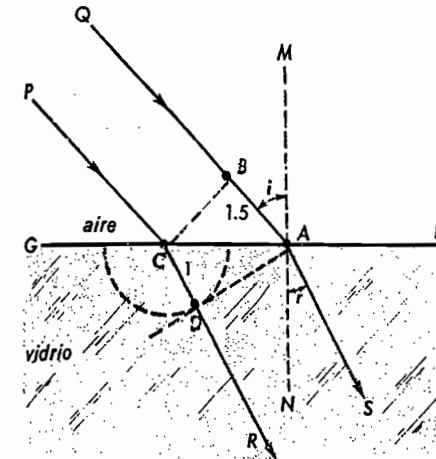


Fig. 21E. Método gráfico para determinar el ángulo de refracción.

hizo con el rayo incidente y el rayo reflejado.

Se encuentra experimentalmente que el ángulo de refracción, r , depende de dos factores: 1) el ángulo de incidencia, y 2) el índice de refracción μ . Como se definió en la sección anterior, el índice de refracción es la relación entre las veloci-

des de la luz en el vacío y en el medio considerado. Para determinar el ángulo de refracción partiendo de estos dos factores, efectuamos la siguiente construcción gráfica ilustrada en la fig. 21E.

Consideremos que la superficie refractora es de vidrio con aire encima, que tiene un índice de refracción, $\mu = 1.5$. Primero se selecciona un rayo de luz, QA, que incide en la superficie con un ángulo i . Usando una regla, se mide un segmento de línea de A hasta el punto B, de manera que $AB = 1.5$ unidades. La unidad de longitud que se escoge aquí es arbitraria y puede ser un centímetro o cualquier otra. Desde B se dibuja una perpendicular a QA, que intercepta la superficie GH en el punto C. A continuación se traza la línea CP paralela a QA para representar el otro límite del haz incidente de anchura CB.

Luego se toma un compás, se abre con un radio de una unidad y tomando como centro el punto C, se traza un arco de círculo como se ve en la figura. Se traza una tangente a este círculo pasando por el punto A, y desde el punto de contacto de la tangente con el círculo se dibuja el rayo refractado CDR. El otro rayo, AS, se dibuja paralelo a CR para representar el otro límite del haz refractado de anchura DA.

Ahora, puede establecerse la ley de la refracción en función de los segmentos BA y CD, como sigue:

$$\frac{BA}{CD} = \mu \quad (21f)$$

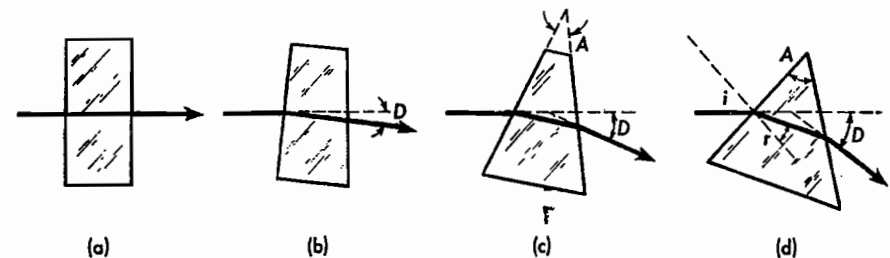


Fig. 21F. Desviación de un haz al cruzar varios prismas hechos del mismo vidrio.

El astrónomo y matemático holandés, Willebrord Snell * descubrió experimentalmente que la relación de estas dos distancias era la misma para cualquier ángulo de incidencia en una sustancia dada. En otras palabras, μ es una constante. Por esto la ecuación (21f) (y la relación expresada por ella) se llama ley de Snell. La razón de la constancia de esta relación, es que, mientras la luz viaja de B a A en el aire, viajará en el vidrio la correspondiente distancia más corta CD .

21.6 Refracción en un prisma. Cuando la luz pasa a través de un prisma se refracta en dos superficies, una vez al entrar y otra al salir. Si las dos caras que atraviesa la luz son paralelas, como en la figura 21F (a), el rayo que sale es siempre paralelo al rayo incidente. Si dichas caras no son paralelas, como en los diagramas (b), (c) y (d), el rayo emergente tiene una dirección distinta. Cuanto mayor es el ángulo A de las dos superficies refractoras, mayor será el ángulo de desviación, D . La luz se desvía acercándose a la normal, al entrar al prisma por la primera superficie. [Véase el diagrama (d).] Al salir al aire por la segunda superficie, la luz se desvía de nuevo, pero alejándose de la normal. Nótese en la fig. 21F, que ni el vértice ni la base del prisma tienen ningún efecto en la desviación de la luz.

Al verificar experimentalmente estos resultados, debe usarse luz de un solo color (monocromática), porque la luz blanca se dispersa en un espectro de colores. Se puede obtener fácilmente la luz de un solo color colocando un filtro de vidrio rojo o verde en el camino de un haz de luz blanca.

Un principio muy útil y general, referente al comportamiento de la luz, es la

reversibilidad de los rayos luminosos. Si en cualquiera de los experimentos o ilustraciones que hemos visto, se invierte el sentido de los rayos, se encuentra que vuelven a recorrer exactamente por la misma trayectoria.

En la fig. 21G se presenta un método gráfico relativamente sencillo para seguir

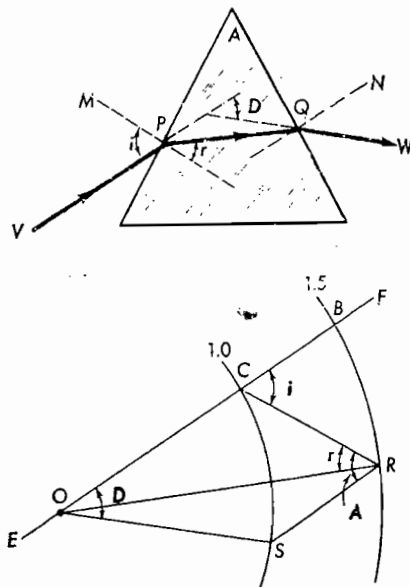


Fig. 21G. Construcción gráfica para determinar la refracción producida por un prisma.

un rayo de luz en su paso a través de un prisma. Se tienen, como datos, un rayo de luz, VP , incidente, con un ángulo i , sobre la primera cara de un prisma de ángulo A y de índice de refracción μ . En este diagrama $A = 60^\circ$, $\mu = 1.5$, $i = 60^\circ$.

Se dibuja primero una línea, EF , paralela al rayo incidente, VP . Tomando por centro cualquier punto, O , y con radio de 1.0 y 1.5 unidades, se trazan los arcos CS y BR de longitud indefinida. Luego se traza una paralela a la normal, M , partiendo de la intersección C y prolongándola hasta cortar el segundo arco en R . Se traza después la línea OR y, partiendo del punto P del prisma, se traza una línea

paralela a OR que corta a la segunda cara en Q . Partiendo de R , se traza una línea paralela a la normal N , que corta al primer arco en S . Por último se traza la línea OS y, a partir del punto Q , en la segunda cara del prisma, una línea, QW , paralela a OS que será la dirección del rayo emergente.

Como esta construcción obedece la ley de Snell, la exactitud de los resultados dependerá sólo de la finura del lápiz y del cuidado con que se haga el diagrama. Además, el diagrama de abajo, tanto como el del prisma, tiene todos los ángulos que intervienen en este último, inclusive el ángulo de desviación D .

21.7 Desviación mínima. Si se hace girar continuamente un prisma en torno a un eje paralelo a su arista refractora, A , mientras está refractando un haz de luz, se observa que el ángulo de desviación disminuye, llega a un mínimo y luego vuelve a aumentar como se ve en la figura 21H. El ángulo más pequeño de des-

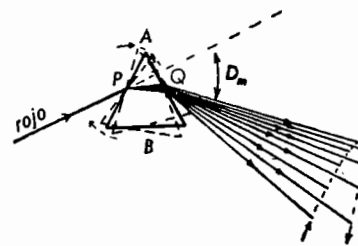


Fig. 21H. La luz refractada por un prisma tiene un ángulo de desviación mínima D_m .

viación producida por un prisma, se llama ángulo de desviación mínima, y se produce para aquel ángulo de incidencia cuyo rayo correspondiente, refractado dentro del prisma, forma ángulos iguales con las caras P y Q .

21.8 Dispersión. Desde la antigüedad, se sabe que la luz del Sol, al pasar a través de los cristales y joyas transparentes, produce luz de colores brillantes. Los primeros filósofos, tratando de explicar este

fenómeno, atribuyeron el origen de los colores al cristal en sí. Fue Newton quien, usando prismas, descubrió que los colores ya estaban presentes en la luz blanca y que la función del prisma era sólo separar los colores al refractarlos en diferentes direcciones. Esto se ilustra esquemáticamente en la fig. 21I.

Ya hemos visto cómo se refracta la luz de un solo color en los límites de un medio

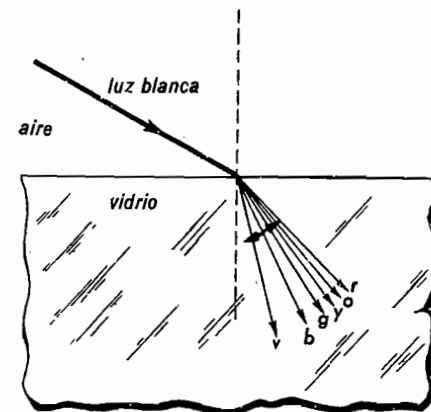


Fig. 21I. (a) Refracción de la luz solar blanca en su espectro de colores puros. (b) La refracción en las dos caras del prisma produce mayor dispersión.

transparente, como el vidrio o el agua, y cómo es desviada por un prisma. Se puede ver en el diagrama cómo, de la luz blanca, se refracta cada color en distinto grado, con su propio ángulo de desviación. La luz roja se refracta el mínimo y la luz violeta el máximo. El espaciamiento angular de todos los colores producidos origina mayor dispersión al mandar la luz a través

* Willebrord Snell (1591-1626), astrónomo y matemático holandés, nació en Leyden. A los 22 años sustituyó a su padre como profesor de matemáticas en la Universidad de Leyden. En 1617 determinó el tamaño de la Tierra por medidas de la curvatura entre Alkmaar y Bergen-op-Zoom. En 1621 descubrió la ley de la refracción que ahora lleva su nombre.

de un prisma, que se llama *dispersión*, y la banda de colores producida en esta forma, *espectro*.

Si se hace pasar luz blanca a través de varios prismas semejantes, pero de diferentes sustancias, se encontrará que cada prisma causa dispersión diferente. Esto puede demostrarse con *prismas sólidos de vidrio flint y corona (crown)* y con prismas de líquidos como *aceite de parafina*, y *agua*. Se notará que los dos prismas de vidrio de la fig. 21J, uno de vidrio flint y el otro de vidrio corona, producen dis-

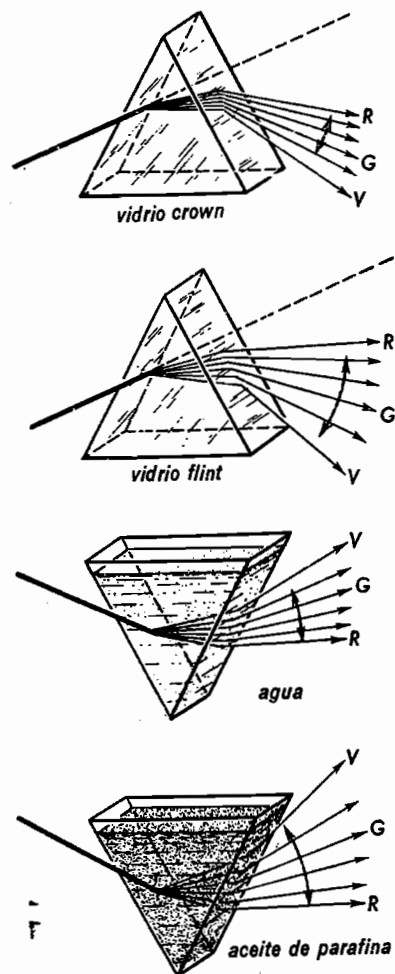


Fig. 21J. Dispersiones de prismas sólidos y líquidos.

persiones muy diferentes. Los prismas líquidos obtenidos llenando con el líquido unos vasos de paredes delgadas de vidrio, también dispersan la luz en diferentes cantidades.

Ya que los distintos colores se refractan en distinta proporción, cada color tendrá diferente índice de refracción. En el vacío todos los colores avanzan con la misma velocidad, 300 000 km/seg; pero en los medios materiales transparentes, como vidrio o agua, marchan considerablemente más despacio y a diferentes velocidades. Entre los colores del espectro, el rojo avanza más aprisa y el violeta más despacio, siendo intermedias entre éstas las velocidades de los demás colores. En el aire hay muy poca dispersión y en el vacío no hay absolutamente ninguna.

La Tabla 21A da los índices de refracción de varios sólidos transparentes. Se notará que aunque los valores para ciertas sustancias no varían grandemente de un color a otro, los valores del azul y el violeta son los más grandes, y los del naranja y el rojo los más pequeños. Obsérvense los valores relativamente altos del diamante y los relativamente bajos del hielo.

21.9 El arco iris. El arco iris es, en la Naturaleza, la exhibición más espectacular del espectro de la luz blanca. Las condiciones necesarias para la aparición de este fenómeno, son que el Sol esté brillando en alguna parte del cielo y que esté lloviendo en el lado opuesto. Dando uno la espalda al Sol, se ve, en forma de arco de círculo, el arco iris primario de colores brillantes y, algunas veces, un arco iris secundario más débil, con los colores en un orden invertido. Vistos desde un lugar alto o desde un aeroplano, estos arcos pueden formar círculos completos, cuyo centro común queda en la dirección de la sombra del observador.

La teoría elemental del arco iris, fue dada por Antonius de Demini en el año 1611 y después desarrollada más exactamente por Descartes. Las características

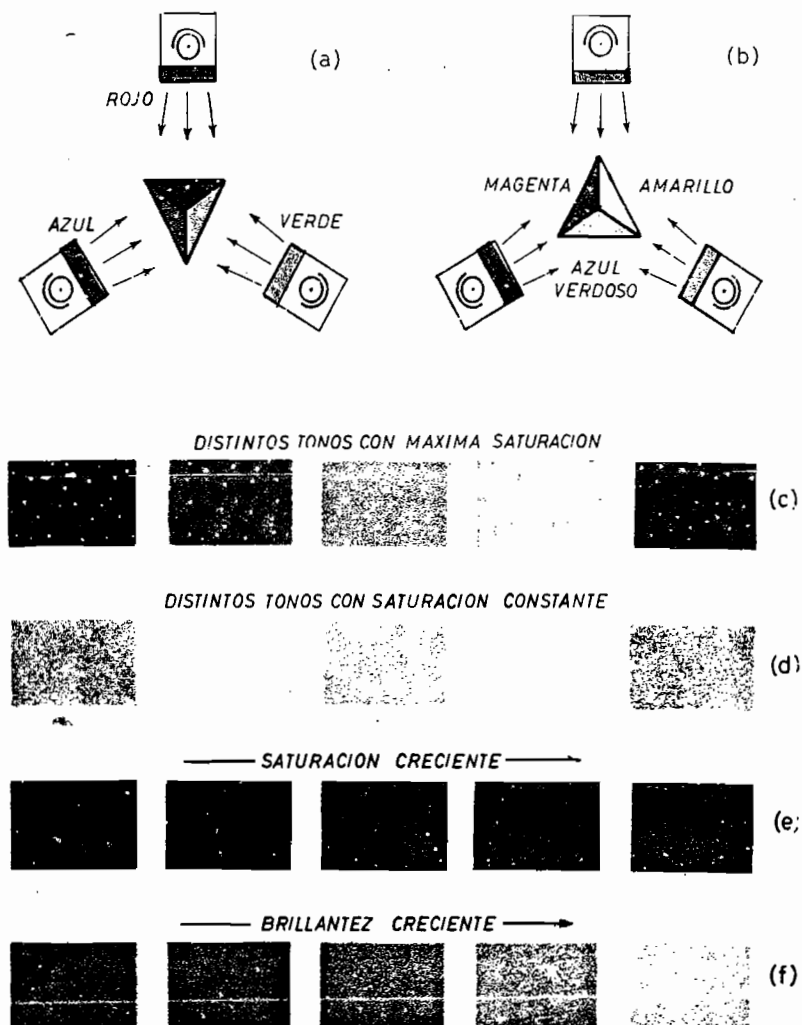


Fig. 22 C.—(a) Primarios aditivos. (b) Mezclas iguales de pares primarios. (c) Diferentes tonos con valores máximos de saturación. (d) Distintos tonos con saturación constante e igual brillo. (e) El mismo tono con brillo constante pero saturación creciente (f) El mismo tono con saturación constante pero brillo creciente.

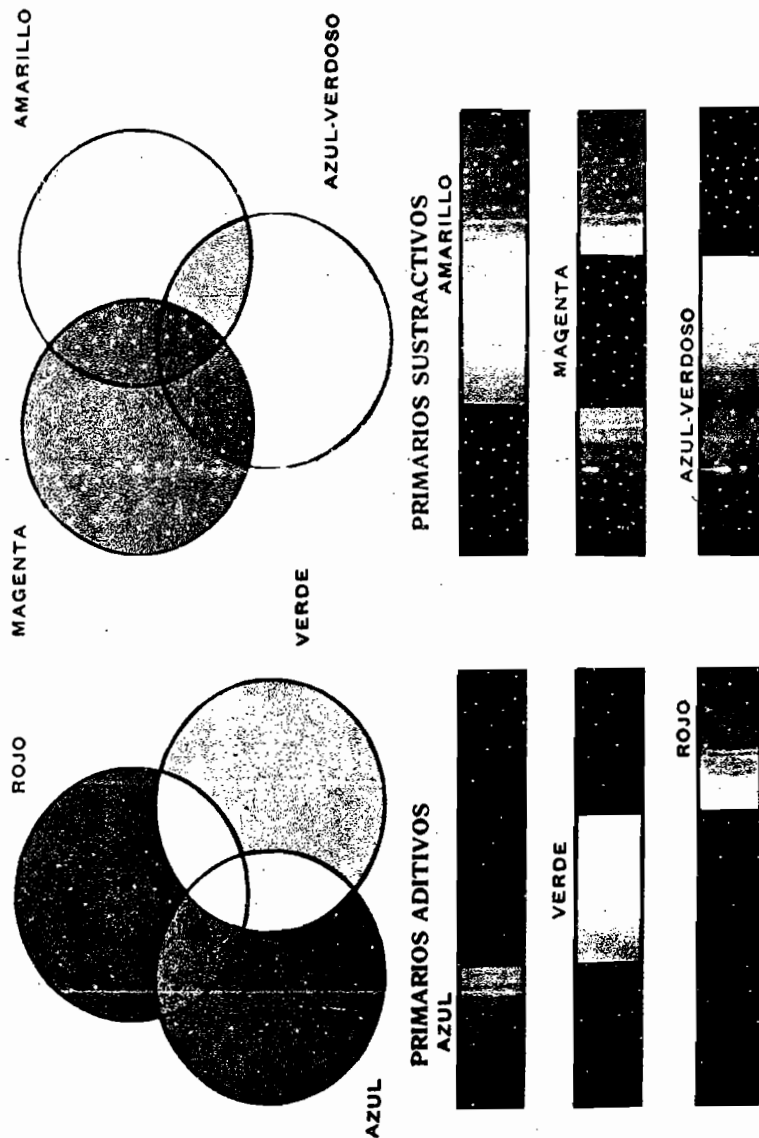


Fig. 22 F.—Colores primarios, sus combinaciones y colores del espectro que los componen.

TABLA 21A. ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE VARIOS SÓLIDOS TRANSPARENTES

Sustancia	Color	Violeta	Azul	Verde	Amarillo	Naranja	Rojo
Vidrio corona (crown)		1.5380	1.5310	1.5260	1.5225	1.5216	1.5200
Vidrio flint ligero ...		1.6040	1.5960	1.5910	1.5875	1.5867	1.5850
Vidrio flint denso ...		1.6980	1.6836	1.6738	1.6670	1.6650	1.6620
Cuarzo		1.5570	1.5510	1.5468	1.5438	1.5432	1.5420
Diamante		2.4580	2.4439	2.4260	2.4172	2.4150	2.4100
Hielo		1.3170	1.3136	1.3110	1.3087	1.3080	1.3060

generales de los arcos *primario* y *secundario*, son explicadas satisfactoriamente, considerando nada más la refracción y la reflexión de la luz en las gotas esféricas de lluvia. Para comprender cómo se produce este fenómeno, primero concentraremos

colores del espectro, desviándose más el violeta y menos el rojo.

Al llegar al lado opuesto de la gota, cada color se refracta parcialmente, saliendo al aire (no se indica) y parcialmente se refleja volviendo al líquido. Al llegar a la superficie inferior, se vuelve a reflejar cada color (no se muestra) y a refractarse. Esta segunda refracción es bastante semejante a la de un prisma (véase la fig. 21I), donde la refracción de la segunda superficie, aumenta la dispersión que ya ha producido la primera. Esta es la trayectoria seguida por la luz en los miles de gotas que en conjunto producen el brillante arco iris primario.

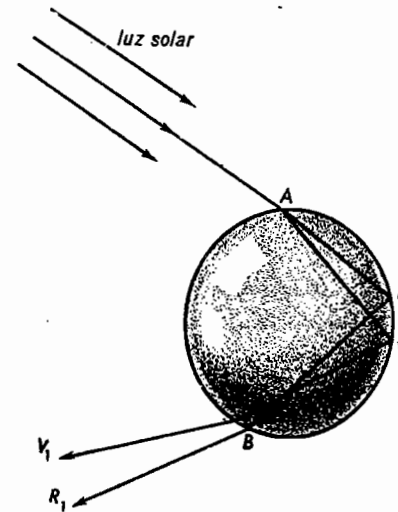


Fig. 21K. Dispersión de la luz solar en una gota de lluvia (Arco Iris primario).

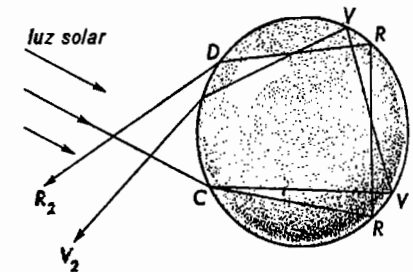


Fig. 21L. Dispersión de la luz solar en una gota de lluvia. (Arco Iris secundario.)

nuestra atención en una gota de lluvia en particular, como se ve en la fig. 21K. Se ve un rayo de luz que entra a la gota en el punto A cerca de la parte superior. En este punto se refleja algo de luz (no se señala), y el resto se refracta entrando en la esfera líquida. En esta primera refracción, se dispersa la luz en los

En la fig. 21L, se ve un rayo luminoso que viene en la misma dirección que la luz del diagrama (a), entrando en una gota de lluvia en el punto C, hacia su parte inferior. Después de una refracción y dos reflexiones internas, vuelve a refractarse la luz y a dispersarse, esta vez en una dirección no muy diferente de la del

diagrama 21K. Este es el camino de la luz en las miles de gotas que producen el arco iris secundario, que es más tenue.

Como se ve en la fig. 21M, el arco iris primario aparece dentro del arco iris secundario, y se produce con la luz que entra por la parte superior de las gotas de agua que están en el lugar apropiado. Aquellas que están en la región R_1 , refractan la luz roja hacia el ojo del observador en el punto O , y el violeta y los demás colores, pasan por encima de su cabeza. Las gotas de la región V_1 refractan la luz violeta hacia el ojo del observador en O , y el rojo y los otros colores hacia sus pies. En otras palabras, la luz que se ve procedente de cada gota es de un solo color, dando

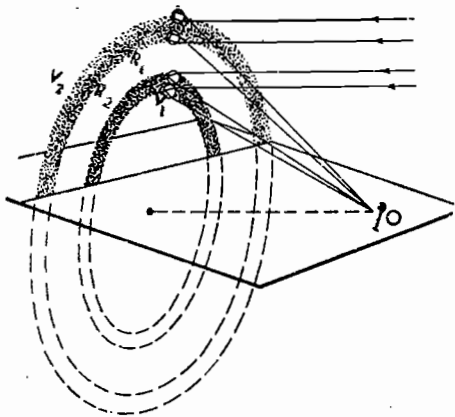


Fig. 21M. Los arco iris primario y secundario vistos por un observador colocado en O .

el mismo todas las gotas que están en un arco de círculo. La razón de esto último es que el ángulo formado entre la luz solar incidente y la luz refractada de cierto color es necesariamente el mismo para cada gota. En el arco primario, ese ángulo es de 42° para el rojo y de 40° para el violeta.

El arco secundario se forma por un razonamiento semejante y aparece con un mayor ángulo de elevación y con los colores

en orden invertido. Los ángulos subtendidos por el arco iris secundario, son de 50° para el rojo y 54° para el violeta.*

21.10 Halos. Los halos se observan comúnmente como leves anillos, parecidos al arco iris, alrededor del Sol o de la Luna y se deben a pequeños cristallitos de hielo que flotan en la estratósfera superior. Estos cristales tienen forma hexagonal y, al actuar como prismas, refractan y dispersan la luz blanca produciendo un espectro. Frecuentemente se observan dos halos, el más brillante formando un ángulo de 22° con la fuente de luz, y el más débil en un ángulo de 46° . Los dos presentan los colores del espectro desordenados y con un tinte marcadamente rojo en el lado interior.

Los cristales, al igual que los prismas, tienen un ángulo de mínima desviación para cada color de la luz y, por estar

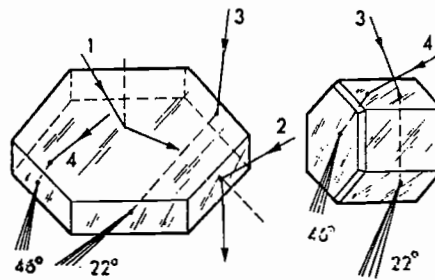


Fig. 21N. Cristales típicos de hielo con los rayos solares reflejados y refractados que van a producir halos.

orientados al azar en el espacio, parecen concentrarla en un círculo, que tiene la fuente luminosa en el centro. Como se ve en la fig. 21N, el ángulo de desviación mínima para la luz que entra y sale por distintas caras de un cristal en forma de placa o de barra, es de 22° y de 46° . El ángulo de 22° aparece en rayos tales como el (3), cuando las dos superficies refrac-

* Para un estudio de los arco iris múltiples, coronas, arcos lunares, etc., véase el Capítulo 38 de *Modern College Physics*, por H. E. White, D. Van Nostrand Co., Inc.

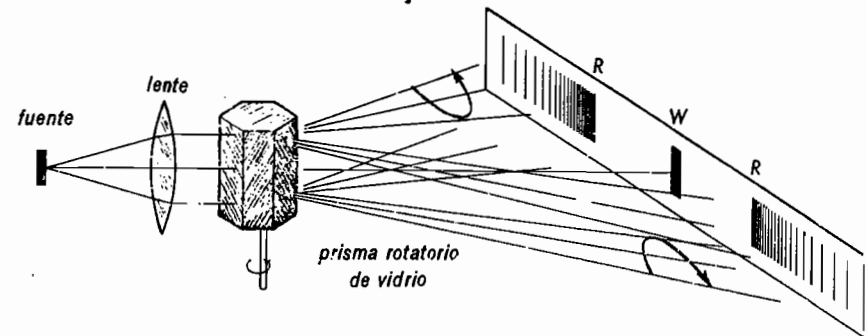


Fig. 21O. Experimento que demuestra la producción de colores con desviación mínima mediante un prisma en rotación.

toras son caras alternadas que forman un ángulo de 60° entre sí. El ángulo de 46° corresponde a rayos como el (4), cuando las dos superficies refractoras forman un ángulo de 90° . (El índice de refracción del hielo para la luz roja, es 1.3060.)

La fig. 21O ilustra una demostración de estos efectos de color, mediante un prisma hace girar rápidamente en torno a su eje,

en medio de un haz intenso de luz blanca. La luz dispersada, al refractarse por las caras alternadas del prisma, barre la pantalla desde los lados hacia el centro, se detiene con la desviación mínima y luego se aleja de nuevo. Las manchas borrosas de luz producidas en la pantalla son más brillantes para los ángulos, R , de desviación mínima.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuál es la ley de la reflexión? ¿Desde qué línea se miden los ángulos?
2. ¿Cómo resulta comparada la distancia de la imagen con la distancia del objeto, ambas medidas desde el espejo plano?
3. ¿Cómo resulta el tamaño de la imagen al compararlo con el del objeto?
4. ¿Es una imagen real la que se ve en un espejo plano? ¿Qué clase de imagen es?
5. ¿Qué es una imagen virtual? ¿Qué es una imagen falseada?
6. Cuando se ve la propia cara en un espejo plano y se pone la mano en la oreja derecha, ¿qué oreja de la imagen parece tocarse?
7. ¿Cómo puede una persona ver su cara como la ven los demás?

8. ¿Cuál debe ser la mínima longitud de un espejo a fin de que un hombre pueda ver todo su cuerpo en él?
9. Definir el índice de refracción y dar un ejemplo.
10. Hacer un diagrama que muestre cómo se refracta un haz de luz al llegar del aire a una superficie tersa de vidrio. Considerar un índice de refracción del vidrio de 1.5.
11. Hacer el diagrama de un prisma. Mostrar un haz estrecho de luz entrando al prisma y la refracción y dispersión de los distintos colores en cada superficie.
12. ¿Cuál es el ángulo de mínima desviación para un prisma? Hacer un diagrama y explicar cómo se puede demostrar esto con un experimento.
13. Hacer un diagrama que muestre la refracción y dispersión de la luz blanca en

una gota de lluvia. Explicar brevemente la formación del arco iris primario.

14. ¿Qué es un halo? Hacer un diagrama de un cristal de hielo y explicar cómo, cuándo dónde se forman los halos.

15. Si se hacen prismas de 45° de los seis materiales ilustrados en la Tabla 21A, ¿Cuál producirá la mayor dispersión?

16. ¿Para qué color es mayor el índice de refracción para cierto material óptico? ¿Para qué color es mínimo?

17. ¿Cuánto tardará la luz en llegar a la Tierra, viniendo de la Luna, si la distancia es de 239,000 mi (380,000 km)? (Resp. 1.28 seg.)

18. ¿Cuánto tardará la luz en llegar a la Tierra desde el Sol, que está a 149 millones de kilómetros?

19. ¿Cuánto tardará la luz en viajar una distancia igual a la circunferencia de la Tierra? (Resp. 0.135 seg.)

20. Incide un haz de luz con ángulo de 60° en la superficie de un vidrio cuyo índice de refracción es de 1.65. Calcular el ángulo de: a) refracción, y b) desviación.

21. Un haz de luz incide con un ángulo de 70° en la superficie de un diamante cuyo índice de refracción es de 2.42. Calcular el ángulo de: a) refracción, y b) desviación. (Resp. a) 22.9° , y b) 47.1° .)

22. La luz incide con un ángulo de 55° sobre la superficie de un prisma de 60° . Encontrar gráficamente la desviación total de la luz si el índice de refracción es 1.50.

23. Un rayo de luz incide sobre la superficie del vidrio a 45° y es desviado un ángulo de 18° . Encontrar el índice de refracción. (Resp. 1.56.)

24. Si la velocidad de la luz en el aire es de 186,300 mi/seg y en un vidrio claro es de 123 800 mi/seg, ¿cuál es el índice de refracción del vidrio? Dar su respuesta con cuatro cifras solamente.

25. Un haz paralelo de luz violeta incide con un ángulo de 75° en la superficie de un vidrio flint denso. Determinar gráficamente el ángulo de refracción. (Ver la Tabla 21A para los índices de refracción) (Resp. 35° .)

26. Un prisma con un ángulo en el vértice $A = 50^\circ$ está hecho de vidrio flint de índice de refracción 1.70. Encontrar gráficamente el ángulo de desviación, D , para un haz de luz que incide en la primera superficie a 60° .

27. Un prisma con un ángulo en el vértice $A = 45^\circ$ está hecho de vidrio corona con índice de refracción 1.50. Determinar gráficamente el ángulo de desviación, D , para un haz de luz que incide en la primera superficie a 45° . (Resp. 26° .)

28. Un prisma de hielo tiene un ángulo en el vértice de 60° . Determinar gráficamente el ángulo de mínima desviación si el índice de refracción es 1.31. (Nota: Empezar con el rayo dentro del prisma formando ángulos iguales con las dos caras.) Comparar su respuesta con los rayos de la fig. 21N. Explicarlos.

29. Encontrar el ángulo máximo de refracción para un rayo de luz que incide en una superficie de vidrio con el índice de refracción $\mu = 1.65$ (Resp. 37° .)

30. Encontrar el ángulo máximo de refracción para un rayo de luz verde que incide en la superficie de un diamante. (Ver la Tabla 21A para el índice de refracción.)

31. Cuando se lanza un rayo de luz a través de un prisma con un ángulo en el vértice $A = 60^\circ$, el ángulo de desviación mínima, D , resulta ser de 45° . Determinar gráficamente el índice de refracción del vidrio. (Nota: En la desviación mínima, los rayos dentro del prisma forman ángulos iguales con las dos caras del prisma y ángulos iguales con los rayos incidente y emergente.) (Resp. 1.59.)

22

LA CIENCIA DEL COLOR

La visión de los colores es, quizá, el don máspreciado de la Naturaleza. Aunque el color es principalmente un fenómeno fisiológico, su origen es considerado por algunos dentro del campo de la física. La ciencia de la mezcla de colores se ha logrado a través del descubrimiento de que todos los colores se pueden analizar completamente dispersándoles en el espectro de un prisma.

22.1 Efecto de la iluminación sobre el color. Para ver un objeto en su verdadero color, debe iluminarse con luz del mismo color. Si, por ejemplo, se coloca una rosa roja bajo los diferentes colores del espectro parecerá ser roja brillante en la luz roja, y gris o negra en todos los demás colores.

En la fig. 22A se señala otro experimento donde una serie de madejas de hilos de color se iluminan con luz roja de una

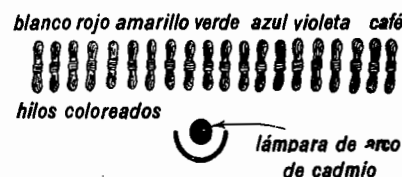


Fig. 22A. Experimentos con ovillos de hilos de color que prueban que para ver un objeto con su verdadero color, se le debe iluminar con la luz apropiada.

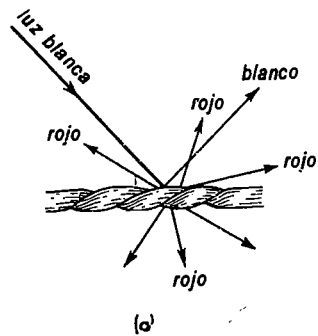
lámpara de arco de cadmio. Cuando se enciende la lámpara, sólo presentan su verdadero color los hilos rojos; el hilo blanco se ve rojo y los otros hilos negros o grises. Si ese mismo grupo de hilos coloreados se ilumina con la luz amarilla de una lámpara de sodio, sólo presentará su verdadero color el hilo amarillo; el hilo blanco se verá ahora amarillo y los demás

se verán grises o negros. En otras palabras, a menos que la fuente emita los colores apropiados, el objeto no podrá verse con su verdadero color. La luz del Sol hace que veamos todos los hilos con su color verdadero, porque la luz del Sol contiene todos los colores del espectro.

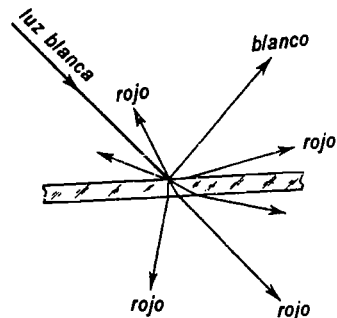
22.2 Color superficial. Los experimentos anteriores demuestran lo que se llama *color superficial*. Cuando la luz del sol cae sobre una rosa roja, un hilo rojo, pintura roja o un vidrio rojo, todos los colores, excepto el rojo, son absorbidos y no pasan a través del objeto o no salen nuevamente de él. Al pasar el rojo, se refleja y se refracta en los finos granos del pigmento y sale en todas direcciones, como se ve en la fig. 22B (a).

No todos los otros colores son absorbidos completamente, sino que algo de luz de cada color es reflejado en la primera superficie, en la que incidió la luz blanca. Esto se puede demostrar con una hoja pulida de vidrio rojo, como se ve en el diagrama (b). Aunque el vidrio se ve rojo desde cualquier lado, se refleja una pequeña cantidad de luz blanca en la superficie de arriba, obedeciendo las leyes de la reflexión. Por otra parte, algo del rojo es reflejado y refractado en la forma normal sobre cada superficie.

Los tres aspectos del color de superficie son: *tono* (o matiz), *luminosidad* (o brillo) y *saturación*. El tono se refiere al nombre del color, el brillo a la magnitud relativa de la respuesta sensitiva y la saturación a la pureza del color. El tono es cualitativo y es el aspecto más distintivo del color, porque éste no existiría sin aquél.



(a)



(b)

Fig. 22B. Color superficial. El hilo rojo y el vidrio rojo se ven rojos desde cualquier lado. Los otros colores presentes en la luz blanca (naranja, amarillo, verde, azul y violeta) son absorbidos por el cuerpo.

El tono no se puede definir, sino solamente expresar en ejemplos: rojo, amarillo, verde, azul, violeta, púrpura y varios intermedios entre ellos. *El brillo es una intensidad subjetiva* y es una medida de la cantidad producida por un cuerpo. El tono no puede existir solo, porque, si tenemos el tono, éste debe tener cierta brillantez y saturación. Estos tres conceptos se ilustran en la fig. 22C.

Los colores que no contienen ningún rastro de luz blanca se dice que están *saturados*. Cuanto más blanco contienen, menos saturados están. El rosa no es un color saturado, ya que es una mezcla de rojo y blanco. Se puede demostrar esto mezclando una pequeña cantidad de pigmento rojo con pintura blanca, o lo que

es todavía más convincente, pulverizando un trozo de vidrio rojo. Cuanto más fino se pulverice este vidrio, más se aumenta la cantidad de luz blanca reflejada al aumentar el área de la superficie, hasta que el polvo resulta casi blanco. Aunque todavía está presente la luz roja, es mucho más intensa, relativamente, la luz blanca. Se produce un efecto similar con sustancias transparentes, como los cristales y vidrios; cuando se pulverizan, se vuelven blancos. *Cuanto más pequeña es la cantidad de luz blanca que se mezcla con el color, mayor es su saturación.*

22.3 Colores metálicos. Algunas sustancias parecen ser de un color a la luz reflejada y de diferente color con luz transmitida. Esto es cierto, especialmente en los metales y en ciertos colorantes de anilina. El oro, por ejemplo, siempre es amarillo

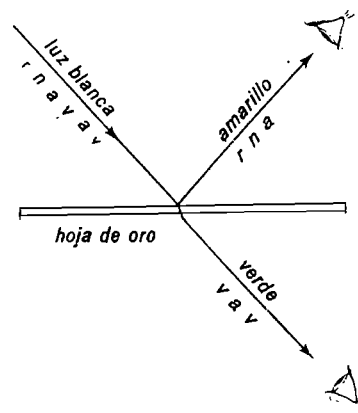


Fig. 22D. Una hoja delgada de oro se ve amarillo-naranja por luz reflejada y azul-verde por luz transmitida.

anaranjado con luz reflejada; pero si es suficientemente delgado, será azul-verdoso al transmitir la luz. Esto se muestra en la fig. 22D.

La luz blanca, compuesta por los colores del espectro, rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta, incide en la lámina delgada de oro. Aunque todos estos colores son reflejados y transmitidos par-

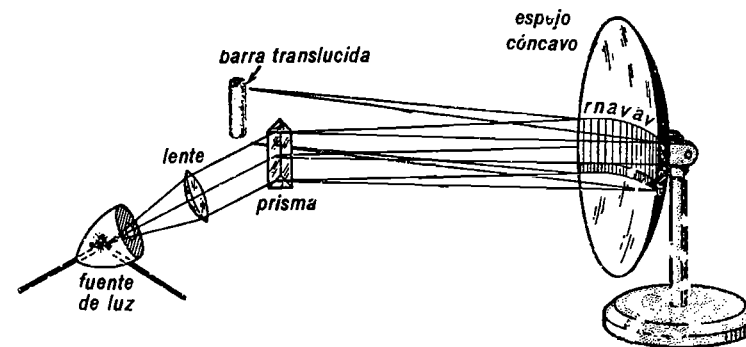


Fig. 22E. Mezcla de colores del espectro para formar los colores primarios.

cialmente, los colores dominantes en la luz transmitida, son el verde, azul y violeta, mientras que en la luz reflejada, son más abundantes el rojo, anaranjado y amarillo. Para el ojo, la mezcla de los colores reflejados se ve amarilla, y la de los colores transmitidos parece verde.

22.4 Mezcla de los colores del espectro. Durante muchos años se han propuesto diferentes gráficas y teorías de los colores; algunas de éstas eran buenas y otras no lo eran. Debido a que las mejores teorías son necesariamente complicadas y llenas de detalles, aquí sólo se darán algunas simplificaciones de sus conceptos y una explicación de sus principios comunes.

Como punto de partida, considérese el experimento ilustrado en la fig. 22E, en el que un pequeño haz de luz blanca y procedente de un arco de carbón se dispersa en un espectro completo después de pasar por una lente y un prisma de vidrio. Con el prisma colocado cerca del centro de curvatura de un espejo cóncavo grande, todos los colores se enfocan, después de la reflexión, sobre una varilla de vidrio translúcida, donde vuelven a combinarse para producir luz blanca. Se sostiene una tarjeta blanca, grande, delante del espejo, para que actúe como pantalla y regule los colores que se dejan mezclar en la varilla. Suprimiendo el violeta, el azul y el verde, por ejemplo, se reúnen los colores

restantes, rojo, anaranjado y amarillo, y la varilla aparece como anaranjada.

Ahora procedemos a dividir el espectro en tres partes iguales como se ve en la parte inferior izquierda de la fig. 22F, y a estas partes las llamamos colores *primarios aditivos*. Cuando se mezcla el rojo y el anaranjado, la varilla se ve de un color rojo brillante; cuando se unen el amarillo y el verde, aparece verde brillante y cuando se combinan el azul y el violeta, se ve azul violáceo. Estos tres primarios aditivos, rojo, verde y azul, tienen la apariencia de los tres grandes círculos que están en la parte superior izquierda en la fig. 22F.

El siguiente paso es mezclar los colores primarios de dos en dos y observar el color de la mezcla. Cuando se combinan el rojo y el verde primarios, producen un color amarillo en la varilla de vidrio, el rojo y azul originan el violeta y el verde y azul dan lugar al azul verdoso. Estos colores, llamados los *primarios subtractivos*, se ilustran en los tres círculos grandes de la parte superior derecha de la fig. 22F y en las áreas superpuestas de la parte superior izquierda. Los colores puros del espectro que forman cada primario subtractivo, se ilustran en la parte inferior derecha.

22.5 El triángulo de los colores. El triángulo de los colores, ilustrado en la fi-

gura 22G, es un ordenamiento triangular de los primarios aditivos y subtractivos con el blanco en el centro. El rojo, verde y azul se colocan en los vértices, mientras que el magenta, amarillo y azul verdoso, se colocan en los lados. El orden de los colores es tal, que la suma de cualquier

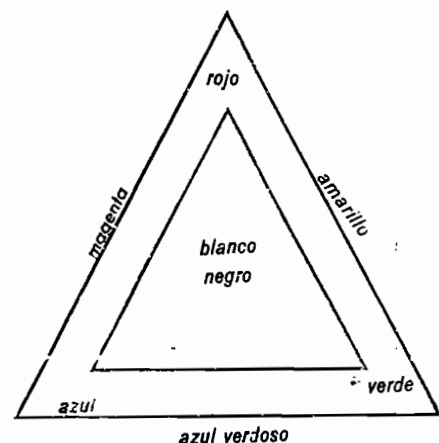


Fig. 22G. El triángulo de los colores con los primarios aditivos en los vértices y los primarios subtractivos en los lados.

par de primarios aditivos de los vértices da el primario subtractivo que están entre ellos; y la suma de los tres, da el blanco del centro.

Los colores opuestos frente a frente en el triángulo son *complementarios*. Se dice que dos colores son complementarios si al sumarse producen blanco. El magenta y el verde son complementarios porque al sumarse, como puede verse por la distribución espectral de la fig. 22F, contienen todos los colores del espectro de la luz blanca. De modo semejante el rojo y el azul verdoso son complementarios, lo mismo que el amarillo y el azul.

22.6 Método aditivo de mezcla de colores. La mezcla de luces coloreadas descrita en las dos secciones anteriores, se llama método aditivo de mezcla de colores y difiere grandemente del método subtractivo que va a describirse en la siguiente sección. En la fig. 22G se presenta un ex-

perimento interesante para la demostración del método aditivo. Se montan tres cajas que contienen luces blancas iluminando separadamente los tres lados de una pirámide blanca. Se coloca enfrente de la abertura de cada caja un juego de filtros de vidrio de cada uno de los colores primarios aditivos, rojo, verde y azul respectivamente, iluminando así las caras de la pirámide como se ve en el diagrama izquierdo (a).

Al hacer girar lentamente la pirámide, se llega a un punto, como se ve en el diagrama de la derecha, donde se mezclan dos luces en cantidades iguales en cada una de las tres caras. Estas mezclas son los primarios subtractivos magenta, amarillo y azul verdoso. Conforme la pirámide gira desde la posición (a) a la posición (b), se ven en las caras de la misma todas las proporciones de combinación de dos colores. La televisión en color se produce por un método aditivo de mezcla de colores.

22.7 Método subtractivo de mezcla de colores. Este es el método más conocido de todos, usado en la mezcla de pigmentos para producir pinturas de diferente coloración. Con este propósito, se usan principalmente los primarios subtractivos magenta, amarillo y azul verdoso, conocidos por los artistas como rojo, amarillo y azul. La mezcla en cantidades iguales de cualquier par de primarios subtractivos, producirá el primario aditivo que queda entre ellos en el triángulo de los colores. Cuando se mezclan pinturas azul verdoso y amarillo, se obtiene el verde.

Al principio parece extraño que el amarillo y el azul verdoso, que no tiene apariencia de un color primario aditivo, puedan producir el verde al mezclarse. Por un análisis de los espectros de estos dos colores, como se presentan en la parte inferior derecha de la fig. 22F, se ve que el verde y el amarillo son los colores del espectro comunes a los dos.

La mezcla por el método subtractivo se demuestra con prismas y filtros en la

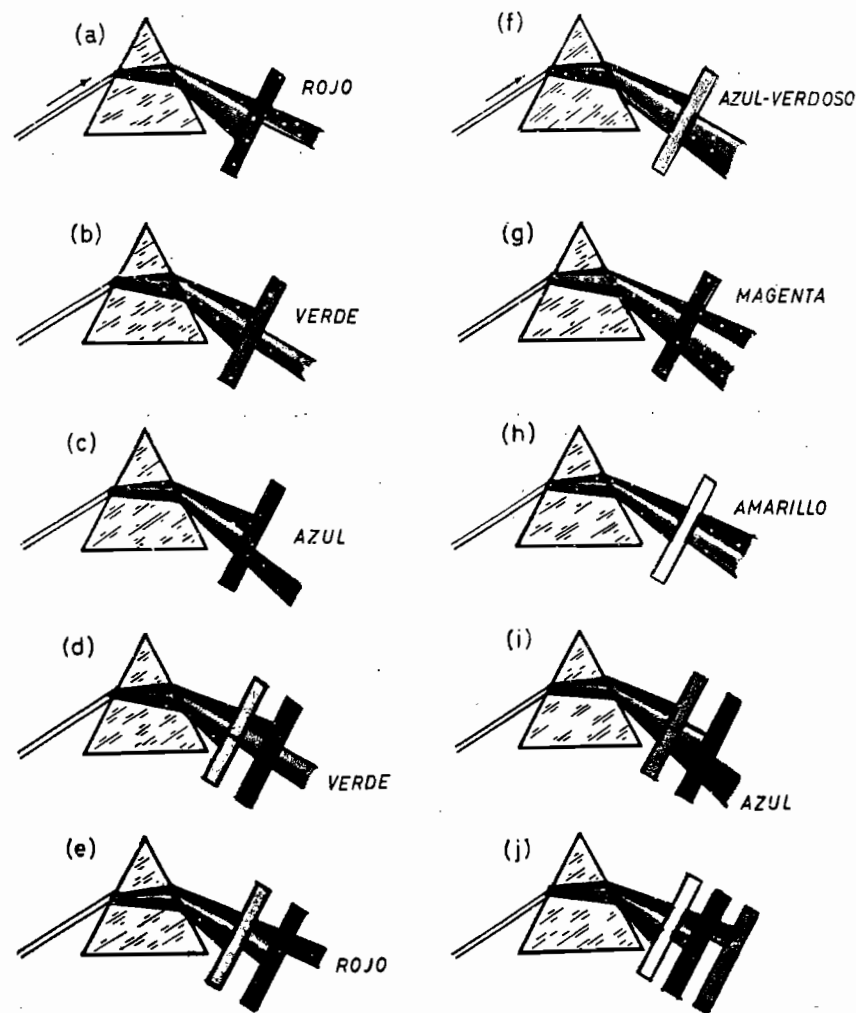


Fig. 22 H.—Absorción de los colores del espectro con filtros de color. Método subtractivo de mezcla de colores.

fig. 22H. Para ver qué sucede a cada tono del espectro en cada filtro, primero se dispersa la luz blanca en su espectro completo. Como ejemplo, vemos que el filtro amarillo del diagrama (h) absorbe al azul y al violeta, y el filtro azul verdoso de (f) absorbe al rojo y al anaranjado. Cuando se insertan los dos como en el diagrama (d), sólo se transmite verde y amarillo. Para el ojo esta mezcla se presenta como verde brillante. Los otros pares de filtros de los diagramas (e) e (i), dan los otros dos primarios, rojo y azul.

Para trasladar estas demostraciones experimentales a la mezcla de pinturas, se considera cada pequeño granito de pigmento como una pieza de vidrio coloreado (véase la fig. 22I). Suponiendo que el

sólo la luz verde y amarilla son transmitidas por ambos pigmentos.

La diferencia esencial entre el método aditivo y el substractivo de la mezcla de colores, es la que su nombre sugiere; en el método aditivo, el color resultante es precisamente la *suma* de los constituyentes

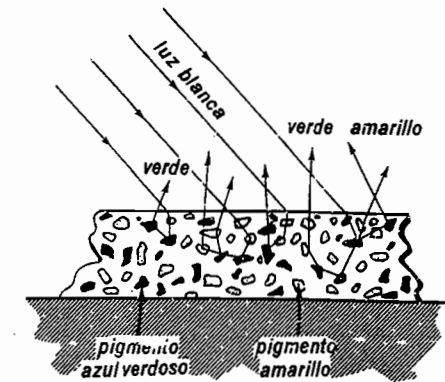


Fig. 22J. Las pinturas amarilla y azul verdosa mezcladas, sólo transmiten los colores espectrales puros, verde y amarillo.

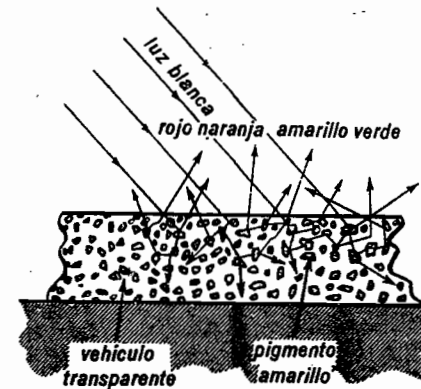


Fig. 22I. Absorción de la luz azul y violeta en pintura amarilla y emisión del rojo, anaranjado, amarillo y verde.

aceite en que está disuelto el pigmento amarillo es transparente, la luz blanca que entra a la pintura es reflejada y refractada como se ve en el dibujo. Los rayos azules o violeta son absorbidos dondequiera que pasan a través de los granos; se pueden escapar todavía el rojo, anaranjado, amarillo y verde. Estos cuatro colores juntos (véase la fig. 22F) aparecen como amarillo.

Cuando son mezclados juntos los pigmentos amarillo y azul verdoso, como se ve en el diagrama detallado de la fig. 22J,

usados para producirlo, y en el método substractivo es precisamente la *diferencia* entre los dos. La suma siempre produce un color más brillante, y la substracción produce un color más oscuro. Así como en la mezcla aditiva del rojo, verde y azul se produce el blanco, en la mezcla substractiva de magenta, amarillo y azul verdoso, se origina el negro. De modo semejante, dos colores complementarios que se mezclan aditivamente, dan lugar al blanco; y, si se mezclan substractivamente, producen el negro. Por eso el blanco y el negro se presentan en el centro del triángulo de la fig. 22G.

22.8 El sistema cromático C.I.I. En 1931 la Comisión Internacional de la Iluminación (C.I.I.) realizó bien planeadas medidas cuantitativas de los colores. Se adoptaron en esa ocasión tres primarios aditivos, rojo, verde y azul, que respondían a la división del espectro visible en tres regiones superpuestas de respuestas espec-

trales más o menos similares a las que se presentan en la parte inferior izquierda de la fig 22F. Aunque el examen de este sistema de patrones C.I.I.* debe dejarse

* Para un estudio del sistema de colores C.I.I., véase "Principles of Physics", Capítulo 13, por F. W. Sears, Addison-Wesley Press.

para estudios más avanzados, sí debe mencionarse aquí que cualquier muestra de color puede medirse con un espectroscopio en función de los tres primarios adoptados, y que el resultado de las medidas puede expresarse con dos números. Estos dos números pueden ser representados en una gráfica.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente lo que sigue: a) color superficial; b) color metálico; c) saturación de color; d) tono, y e) brillo o luminosidad.
2. ¿Qué es el triángulo de los colores? ¿Qué colores están colocados en los vértices? ¿Qué colores están colocados en los lados? ¿Qué mezclas quedan en el centro?
3. Hacer cuadros mostrando las varias partes de los colores puros del espectro que corresponden a cada primario aditivo y sustractivo.
4. ¿Qué son los colores complementarios? Cuando se reúnen dos colores complementarios, ¿qué colores del espectro estarán presentes? Si se mezclan sustractivamente, ¿qué colores del espectro estarán presentes?
5. ¿Cuál de los dos métodos de mezcla de colores produce colores brillantes como resultado de la mezcla?
6. Se mezclan aditivamente los siguientes pares de colores. ¿Cuál es su color resultante? a) Azul y verde; b) azul y rojo; c) azul y amarillo, d) rojo y azul verdoso, y e) verde y rojo.
7. Los siguientes pares de colores son mezclados como pigmento. ¿Cuál es el color resultante? a) Magenta y azul verdoso; b) amarillo y azul verdoso; c) magenta y amarillo; d) rojo y azul verdoso, y e) magenta y verde. (Resp. a) azul; b) verde; c) rojo; d) negro; e) negro.)
8. ¿Qué color agregado al rojo dará: a) blanco; b) magenta, y c) amarillo?
9. Hacer un diagrama y explicar brevemente cómo es que los pigmentos amarillo y azul verdoso mezclados como pinturas pueden producir verde. ¿Acaso las partículas del pigmento se vuelven verdes?
10. ¿Cómo puede demostrarse que los colores del espectro se combinan para formar los colores indicados en el triángulo de colores? Describir el experimento.
11. ¿Qué colores mezclados sustractivamente con amarillo producirán: a) verde; b) rojo, y c) negro?

23

LENTES E INSTRUMENTOS OPTICOS

23.1 Lentes. La función primordial de las lentes es formar imágenes de los objetos reales. Aunque la mayoría de las lentes se hacen de vidrio corriente, algunas lentes especiales se construyen de otros materiales transparentes, como *cuarzo* y *fluorita*. Para comprender los principios en que se basa el funcionamiento de las lentes, ima-

gínesse un grupo de varios prismas y trozos de vidrio colocados en el orden de la figura 23A. En el primer ordenamiento, los prismas están acomodados para refractar a los rayos paralelos que inciden sobre ellos, en tal forma que los rayos emergentes converjan en el foco F . En el segundo ordenamiento, los rayos paralelos se hacen divergentes como si hubieran salido de un punto común, F' . En cada sistema se produce la máxima desviación en los prismas exteriores, que son los que tienen mayor ángulo entre las dos superficies refractoras. En los rayos centrales no se produce

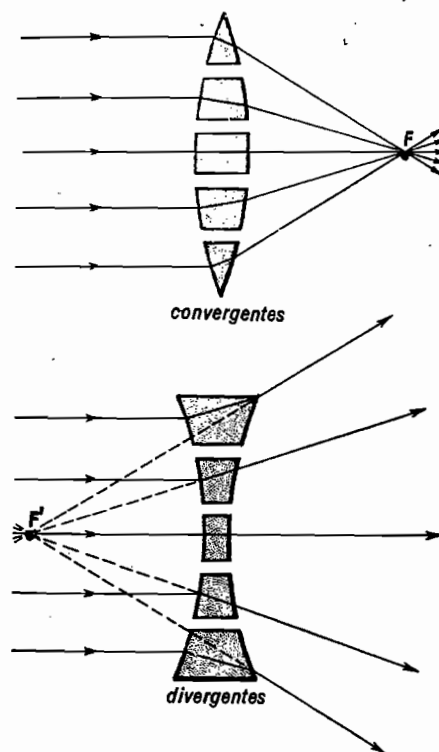


Fig. 23A. Juegos de prismas combinados para ilustrar la acción de las lentes.

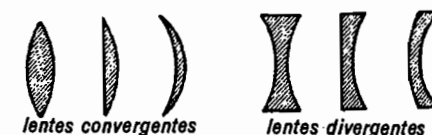


Fig. 23B. Cortes transversales de lentes corrientes.

ninguna desviación porque ahí las caras del vidrio son paralelas entre sí.

Una lente verdadera no está formada de prismas, como los de la fig. 23A, sino que es una pieza sólida de vidrio con superficies pulidas con forma esférica. En la fig. 23B se ven secciones transversales de varias lentes normales. Las primeras tres lentes, que son más gruesas en el centro, son llamadas *lentes convergentes* o *positivas*, mientras que las tres últimas, son más delgadas en el centro y se llaman *lentes divergentes* o *negativas*. A cada una de estas seis lentes corresponden los nombres particulares siguientes: 1) *biconvexa*, 2)

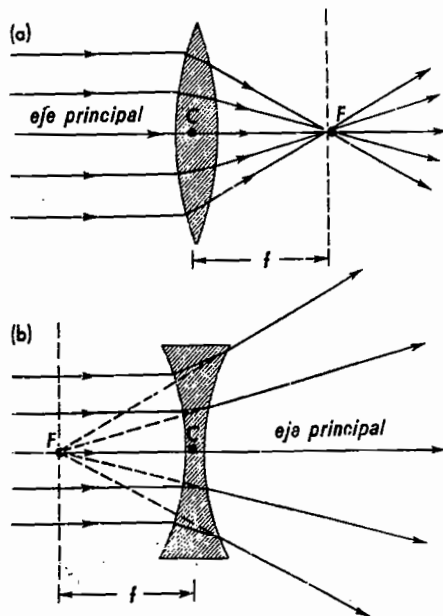


Fig. 23C. Lentes convergentes y divergentes.

planoconvexa, 3) menisco convexo, 4) bi-cóncava, 5) planocóncava, 6) menisco cóncavo.

En la fig. 23C se ven diagramas que explican la refracción de la luz en lentes convergentes y divergentes. En cada caso, el eje principal es una línea recta que pasa por el centro de la lente y es perpendicular a las dos caras en el punto en que las corta. El foco principal, F , está en el eje

principal y se define en el caso de la lente convergente como el punto en que convergen, después de pasar por la lente, los rayos incidentes paralelos al eje; y para la lente negativa, como el punto del cual parecen venir los rayos que en realidad llegaron paralelos al eje. Por simetría, todas las lentes tienen dos focos principales, uno a cada lado de la lente y a la misma distancia del centro de la lente. La distancia desde el foco principal la lente se llama distancia focal.

$$CF = \text{distancia focal} = f$$

Un plano perpendicular al eje principal que pase a través de cualquiera de los focos principales, se llama *plano focal*. Los rayos paralelos de luz que entran a la lente en cualquier dirección distinta de la señalada en los diagramas, se reunirán en algún punto contenido en el plano focal. Este punto se localiza rápidamente recordando que un rayo que pasa por el centro de una lente no cambia de dirección.

Cuanto mayor es la curvatura de las dos superficies de la lente, más corta es su distancia focal. La razón de esto, que puede verse por los esquemas, es que a mayor curvatura, mayor es la desviación de los rayos luminosos que cruzan la lente cerca de sus bordes.

Un principio importante, relativo a las lentes, es el de la reversibilidad de los ra-

ynos luminosos. Si se coloca en F de la figura 23C (a) una fuente de luz, los rayos de luz que caen sobre la lente serán refractados en forma de haz de rayos paralelos que salen hacia la izquierda. De modo semejante, en la fig. 23C (b), los rayos de luz que convergen hacia el foco F , serán refractados, saliendo de la lente como un haz de rayos paralelos.

23.2 Formación de imágenes. Cuando se coloca un objeto por un lado de una lente convergente y más allá de su foco principal, se formará una imagen invertida en el lado opuesto de la lente. Esto se ilustra en la fig. 23D. Si se mueve el objeto acercándolo al foco, la imagen se formará más lejos de la lente y será más grande, es decir, más aumentada. Conforme el objeto se traslada, alejándolo de la lente, la imagen se va acercando al foco y se hace más pequeña.

En general, hay dos formas de determinar exactamente la posición de una imagen: una es la construcción gráfica y otra es el uso de la siguiente ecuación de las lentes:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \quad (23a)$$

donde p es la distancia del objeto, q es la distancia de la imagen y f la distancia focal.

En la fig. 23E se ilustra el método gráfico de localización de las imágenes. Consideremos la luz emitida por algún punto particular, como el O del objeto. De los rayos que salen de ese punto en todas direcciones, el rayo OA que avanza paralelo al eje principal será refractado de manera que pase por el foco principal F [véase la fig. 23C (a)]. El rayo OC que llega al centro de la lente, donde las caras son paralelas, pasará sin desviarse, encontrando al otro lado en un punto I . Estos dos rayos localizan el extremo de la imagen en el punto I . Todos los demás rayos que salen del punto O e inciden sobre la lente, irán a enfocarse en aquel mismo punto. Para confirmar esto, nótese que el rayo OF , que pasó de O a través del foco del lado izquierdo, debido al principio de la reversibilidad de los rayos de luz, se refractará saliendo paralelo al eje principal y cruzando a los otros rayos, en I , como se ve en la figura.

El uso de la ecuación de las lentes puede ilustrarse por el siguiente ejemplo. Supongamos un objeto a 60 cm por delante de una lente con distancia focal de 20 cm. Si resolvemos la ecuación (23a), para q , obtenemos la expresión:

$$q = \frac{pf}{p-f} \quad (23b)$$

Sustituyendo entonces las cantidades conocidas, obtenemos

$$q = \frac{60 \times 20}{60 - 20} = 30 \text{ cm}$$

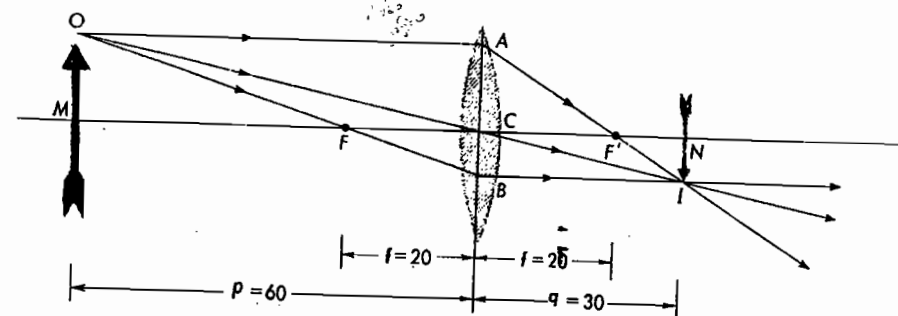


Fig. 23E. Determinación gráfica del tamaño y posición de la imagen.

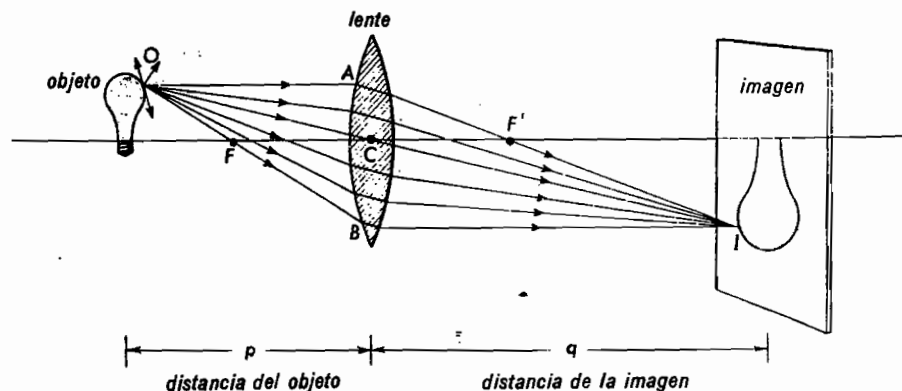


Fig. 23D. Formación de una imagen real con una lente convergente simple.

La imagen se forma a 30 cm detrás de la lente, o sea, a 10 cm del foco F .

Si se usa una regla graduada en centímetros para construir gráficamente este problema, el diagrama resultante será parecido al de la fig. 23E. Se traza cada línea en su posición apropiada y a escala, y cuando se localiza la imagen por los tres rayos, se mide su distancia y tamaño con la misma escala. Si se dibuja con cuidado, los resultados gráficos coincidirán en todo con los resultados calculados por las ecuaciones anteriores.

23.3 Imágenes virtuales. Las imágenes formadas por las lentes de las figs. 23D y 23E son *reales*. Las *imágenes reales* se definen como aquellas que pueden formarse sobre una pantalla y se caracterizan por el hecho de que los rayos de luz se reúnen realmente allí en un foco. Las *imágenes virtuales*, no son reales, no se pueden for-

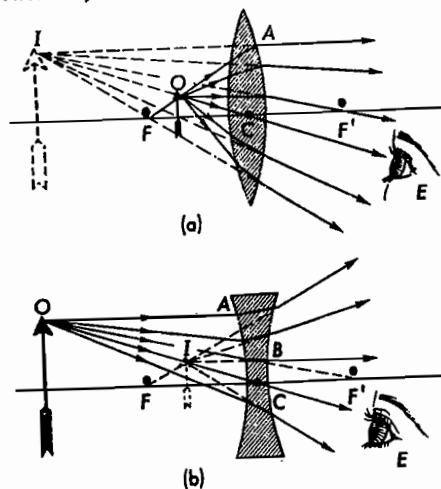


Fig. 23F. Formación de imágenes virtuales.

mar sobre una pantalla y los rayos procedentes del objeto no pasan por los puntos correspondientes de la imagen, sino sus prolongaciones. Se pueden observar imágenes virtuales con una lente convergente colocando el objeto cerca de ella, entre ésta y el foco, o con lentes divergentes con

el objeto situado en cualquier lugar. En la fig. 23F se ilustran estos dos ejemplos.

En el primer caso, la lente se usa como amplificador, o *lupa*. Los rayos de luz que parten de la punta del objeto O son refractados en la dirección apropiada; pero no son desviados lo suficientemente, como para llegar a enfocarse. Para el ojo del observador que está en E , estos rayos parecen venir de un punto I , situado detrás de la lente. Esta es una *imagen virtual, derecha y aumentada*. Para encontrar gráficamente esta imagen, observamos que el rayo FOA se ha de refractar para salir paralelo al eje principal. El rayo OC , que pasa por el centro de la lente, sigue sin desviarse. Al prolongar hacia atrás estos dos rayos refractados, se cortan en I . Si se usan, en este caso, las ecuaciones de las lentes (23a) o (23b) para encontrar la imagen, la distancia de la imagen q resultará una cantidad negativa, indicando que es una imagen virtual y que está en el mismo lado de la lente en que se encuentra el objeto.

En el caso de la lente divergente, las imágenes siempre son virtuales derechas, más cercanas a la lente y más pequeñas que el objeto. Como se ve en la fig. 23F (b), los rayos de luz que parten del punto O del objeto son refractados, resultando divergentes al otro lado de la lente. Para el ojo del observador que está en E , estos rayos parecen venir del punto I , que está detrás de la lente, pero más cerca que el objeto. Para encontrar esta imagen, vemos que el rayo OA , paralelo al eje principal, debe refractarse en tal dirección que parezca venir de F . El rayo OC pasa por el centro y sigue sin desviarse. Ya que estas dos direcciones se cortan en I , será allí donde se forme la imagen.

Al aplicar las ecuaciones a las lentes divergentes, la distancia focal f es siempre de signo *negativo*. Para ilustrar esto, consideremos el siguiente ejemplo.

Ejemplo: Se coloca un objeto 30 cm delante de una lente divergente que tiene una distancia focal de -15 cm. Localizar la posición de la imagen.

Solución. Sustituyendo en la ec. (23b), obtenemos:

$$q = \frac{pf}{p - f} = \frac{30 \times (-15)}{30 - (-15)} = \frac{-450}{+45} = -10 \text{ cm}$$

Se encuentra que la imagen está a 10 cm de la lente, indicando el signo negativo que es virtual y está en el mismo lado de la lente donde está el objeto.

Hay una convención de signos muy útil para hacer los diagramas y los problemas de lentes usando las ecuaciones (23a) o (23b), que es la siguiente:

1. Un objeto real se representa siempre colocado a la izquierda de la lente.
2. Los rayos de luz que entran y pasan por la lente se dibujan de izquierda a derecha.
3. Todas las distancias son medidas desde el centro de la lente.
4. Para cualquier objeto colocado a la izquierda de la lente, la distancia del objeto es positiva.
5. Para cualquier imagen obtenida a la derecha de la lente la distancia de imagen es positiva.
6. Para cualquier imagen encontrada a la izquierda de la lente la distancia de imagen es negativa.

Cuando se usa la ecuación (23a) para resolver un problema, se debe recordar siempre que deben sustituirse dos de las cantidades con su signo y la magnitud correctas, dejando que la solución de la ecuación nos dé el signo y magnitud correctos para la tercera cantidad.

23.4 La cámara fotográfica. Ya que la cámara fotográfica emplea un solo sistema de lentes, puede considerarse como uno de los instrumentos ópticos más sencillos. Como se ilustra en la cámara de la figura 23G, la lente convergente forma una *imagen real e invertida* sobre la película.

Si el objeto está lejos, los rayos de luz que llegan a la lente son casi paralelos y la imagen se forma en el plano focal. Si

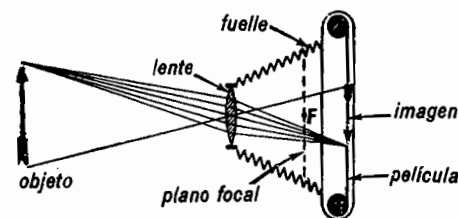


Fig. 23G. Formación de la imagen en la cámara fotográfica.

el objeto está cerca, la imagen se formará más allá de dicho plano, como se ve en el dibujo. Para que puedan tomarse paisajes distantes y primeros planos con la misma cámara, se usa un fuelle o un sistema de tornillo que permite que se varíe la distancia de la lente a la película a voluntad. Al movimiento de la lente hasta conseguir la distancia apropiada de la imagen se le llama *enfocar*.

En las cámaras más baratas, se usa una sola lente convergente, lo que significa que se harán presentes todos los defectos corrientes de estas imágenes produciendo una imagen ligeramente difusa o borrosa. En las cámaras de mejor calidad, con el uso de lentes compuestas, formadas de varias lentes individuales, se corrigen bastante bien los defectos más acusados. Como regla general, una lente buena para cámara está compuesta de tres a cinco elementos y está especialmente corregida de la *aberración cromática*, la *aberración esférica*, el *astigmatismo* y la *curvatura de campo*.

El diafragma iris se usa con el propósito de disminuir la abertura efectiva de la lente, y así aumentar su *número f*. Esto es conveniente al fotografiar objetos inanimados, porque, cuanto más pequeña es la abertura de la lente, más preciso será el enfoque de objetos cercanos y distantes, así como de los centrales y periféricos. El *número f* de una lente es igual a su distancia focal dividida por su diámetro.

23.5 El ojo. En la introducción de este libro, se presentaron algunos aspectos del instrumento óptico más notable, que es el ojo humano. Allí se dijo que el ojo es, en

de veces que parece haberse ampliado el objeto cuando se ve con el antejo. Cuando se aplica la geometría plana a un esquema simple de los rayos de luz en un antejo, se encuentra que el aumento (potencia amplificadora) es igual a la relación que hay entre las distancias focales de los dos lentes.

$$\text{Ampliación} = \frac{F}{f} \quad (23c)$$

donde F es la distancia focal del objetivo y f la distancia focal del ocular.

Supongamos, como ilustración, que el objetivo de un pequeño antejo tiene una distancia focal de 90 cm, y que se usa con un ocular con distancia focal de 3 cm; la ampliación será $90/3$, o sea, 30. Los objetos distantes, vistos a través de este antejo, parecerán ser 30 veces más altos y 30 veces más anchos que cuando se ven a simple vista. Si se usa un ocular con distancia focal de solamente 1.5 cm, con el mismo objetivo, el aumento será el doble, o sea 60.

23.7 Binoculares prismáticos. Los binoculares prismáticos, en realidad, son dos antejos gemelos montados uno junto al otro para usarse uno en cada ojo. Los objetivos que tienen al frente y los oculares que están detrás, son lentes convergentes, igual que en el telescopio astronómico; pero los pares de prismas de reflexión total que tienen (véase la fig. 23J), invierten los rayos dando imágenes derechas. El ir y venir de la trayectoria de los rayos de luz tiene la ventaja de permitir el uso de objetivos de distancia focal más grande, montados en tubos cortos, permitiendo un mayor aumento. Además de las buenas lentes acromáticas y de los prismas bien pulidos, hay tres características más que son necesarias para unos buenos binoculares: 1) *ampliación*, 2) *campo visual* y 3) *luminosidad*.

Para el uso manual, son usados muy comúnmente los binoculares con potencia

amplificadora de 6, 7 u 8. Los que tienen ampliaciones mayores de 8, son deseables, pero generalmente necesitan de un trípode para darles estabilidad. Para aumentos menores de 4, las aberraciones producidas por las lentes contrarrestan la ampliación, y la mayoría de las personas pueden ver mejor sin esa ayuda óptica.

El campo visual es determinado principalmente por la abertura del ocular, y debe ser tan grande como sea posible. Para binoculares con poder amplificador

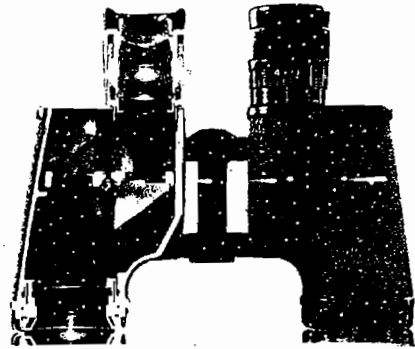


Fig. 23J. Corte de unos binoculares prismáticos, mostrando sus lentes y prismas de reflexión total. (Cortesía de Bausch and Lomb Optical Company.)

de 7, se considera grande un campo de 6° , ya que en el ocular ese campo se extiende a un ángulo de 7×6 , o sea, 42° .

El diámetro de cada objetivo determina la luminosidad, que es importante por la noche, cuando hay poca luz disponible.

Los binoculares con especificaciones 6 por 30, tienen una ampliación de 6, y un objetivo con diámetro efectivo de 30 mm. La especificación 7×50 significa una ampliación de 7 y un objetivo de 50 mm de diámetro. Aunque los binoculares con la especificación anterior son excelentes de día o de noche, son considerablemente más grandes e incómodos que los utilizados durante el día, señalados como de 6×30 u 8×30 . Para el uso en la vida civil, estos dos últimos tipos son decididamente los más deseables.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Qué es una lente convergente? ¿Qué es una lente divergente? ¿Cómo puede distinguirse una lente convergente de una divergente por el tacto?

2. ¿Cómo se encuentran los focos de una lente? ¿Qué es la distancia focal?

3. Si se conoce la distancia focal de una lente, ¿cómo se puede producir un haz de rayos paralelos de luz? ¿Puede usarse una lente divergente? ¿Por qué?

4. Si se conocen la distancia del objeto y la distancia focal, ¿cómo se puede encontrar la imagen formada por una lente simple? Escribir la fórmula usada.

5. ¿Dónde tiene que colocarse un objeto para formar una imagen virtual con una lente convergente? ¿Dónde debe estar para tener seguridad de que se forme una imagen real?

6. ¿Puede colocarse un objeto en cualquier punto cercano a una lente cóncava de manera que: a) se forme una imagen real, o b) no se pueda formar una imagen virtual?

7. ¿Qué son los focos conjugados? Si se intercambian el objeto y la imagen, ¿será la misma imagen en los dos casos? (Probar a hacerlo con una lente.)

8. Definir o explicar brevemente lo que siguiente: a) distancia focal; b) distancia de imagen; c) número f ; d) acomodación, y e) ampliación.

9. Hacer un diagrama mostrando la refracción de un haz incidente de rayos paralelos con: a) una lente convergente, y b) con una lente divergente. Indicar el foco principal y la correspondiente distancia focal.

10. Hacer un diagrama de un telescopio astronómico, indicando la lente objetivo y la lente ocular. Mostrar la posición de todos los puntos focales y establecer la relación con que se puede determinar la ampliación.

11. Un objeto de 4 cm de altura se coloca a 12 cm por delante de una lente con-

vergente de distancia focal +8 cm. Encontrar: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen usando la ecuación de las lentes y por el método gráfico. (Resp. a) +24 cm; b) +8 cm.)

12. Un objeto de 2 in de altura se coloca a 20 in por delante de una lente convergente con distancia focal de +12 in. Encontrar: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen por la ecuación de las lentes y por el método gráfico.

13. Una lente convergente tiene +12 cm distancia focal. Encontrar: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen si se coloca un objeto de 3 cm de altura a 30 cm delante de la lente. (Resp. a) +20 cm; b) +2 cm.)

14. Un objeto de 2 cm de altura se coloca a 12 cm delante de una lente convergente de 18 cm de distancia focal. Encontrar: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen.

15. Un objeto de 3 cm de altura se coloca a 16 cm delante de una lente convergente de 8 cm de distancia focal. Encontrar: a) la distancia de la imagen por cálculos, y b) el tamaño de la imagen por construcción gráfica. (Resp. a) +16 cm; b) +3 centímetros.)

16. Un objeto de 3 cm de altura se coloca 4 cm delante de una lente convergente de 8 cm de distancia focal. Encontrar: a) la distancia de imagen por cálculos, y b) el tamaño de la imagen por construcción gráfica.

17. Un objeto de 2 cm de altura se coloca a 12 cm por delante de una lente divergente con distancia focal de 4 cm. Encontrar: a) la distancia de imagen por cálculos, y b) el tamaño de la imagen por construcción gráfica. (Resp. a) -3 cm; b) -0.5 centímetros.)

18. Un objeto de 4 cm se coloca en el plano focal de una lente divergente con distancia focal de -10 cm. a) ¿Dónde se va a formar la imagen?; b) ¿de qué tamaño es la imagen?; c) ¿es real o virtual?; d) ¿es invertida, o derecha?

19. Un objeto de 4 cm. de altura se coloca a 20 cm por delante de una lente convergente de 4 cm de distancia focal. Encontrar gráficamente: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen. (Resp. a) +5 cm; b) 1 cm, invertida.)

20. Un objeto de 2 cm de altura se coloca a 12 cm por delante de una lente convergente de 6 cm de distancia focal. Localizar gráficamente: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen.

21. Un objeto de 3 cm de altura se coloca a 8 cm por delante de una lente convergente de +4 cm de distancia focal. Encontrar gráficamente: a) la posición, y b) el tamaño de la imagen. (Resp. a) +8 cm; b) +3 cm, invertida.)

22. Se coloca un objeto a 12 cm por delante de una lente convergente de 3 cm de distancia focal. Calcular la posición de la imagen.

23. Se coloca una lente convergente con distancia focal de +30 in a 105 in de distancia del objeto. Calcular la distancia de la imagen medida desde la lente. (Resp. +42 in.)

24. Una lente divergente con distancia focal de -12 in se coloca a 36 in de un objeto. Calcular la distancia de la imagen.

25. Una lente de aumento con distancia focal de +1.5 in se coloca a 1.2 in de un objeto pequeño. Encontrar la distancia de

la imagen: a) gráficamente, y b) por la ecuación. (Resp. -6 in.)

26. Se usa una lente con distancia focal de +2.5 cm como lente de aumento. Si se coloca a 2.0 cm de un objeto pequeño, encontrar la distancia de imagen: a) gráficamente, y b) por la ecuación de las lentes.

27. La lente objetivo de un pequeño telescopio tiene una distancia focal de 50 in. Encontrar la ampliación si la distancia focal del ocular es de +0.75 in. (Resp. 66.7)

28. ¿Dónde debe colocarse un objeto frente a una lente con distancia focal de +15 cm si se ha de formar una imagen real a una distancia tres veces mayor que la distancia del objeto?

29. Las lentes objetivo de unos binoculares tienen un diámetro de 4 cm y una distancia focal de 28 cm, mientras que la lente del ojo tiene una distancia focal de 4 cm. ¿Cuáles son las especificaciones de esos gemelos? (Resp. 7×40 .)

30. Un objeto de 4 cm de altura se coloca a +30 cm por delante de una lente convergente con distancia focal de +15 cm. a) Encontrar la posición de la imagen. Una segunda lente, con distancia focal de +30 cm se coloca a 10 cm a la derecha de la primera lente. b) Encontrar la posición de la imagen final. (Nota: La imagen de la primera lente es el objeto para la segunda lente, pero con signo negativo en este caso.)

24

DIFRACCION, INTERFERENCIA Y POLARIZACION

Cuando la luz pasa próxima al borde de cualquier objeto opaco, dobla levemente su trayectoria y sigue adelante en una nueva dirección. Este doblez de la luz alrededor de las esquinas se llama difracción. En los capítulos anteriores se estudió la luz propagándose en línea recta, obedeciendo las leyes de la reflexión y la re-

frangas angostas de luz. Para observar este efecto, puede realizarse el siguiente experimento simple en un cuarto oscuro. Se coloca en un lado del cuarto una caja que contenga una lámpara eléctrica, una pantalla de vidrio esmerilado para observación en el otro lado del cuarto. Entonces se

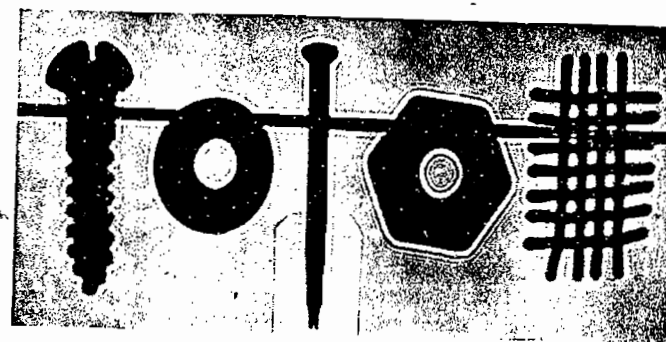


Fig. 24A. Fotografía de las sombras proyectadas por objetos pequeños. Las bandas angostas se deben a la difracción de la luz.

fracción. Más aún, conforme a la propagación rectilínea de la luz, se acostumbra creer que un objeto ha de proyectar una sombra precisa y bien definida. Pero un examen minucioso de cualquier sombra, prueba que los contornos no son nítidos sino borrosos y difusos.

Si se tiene el cuidado de escoger una fuente de luz pequeña, como es la que pasa por la perforación de una punta de alfiler hecha en una pantalla, la sombra que proyecta un objeto sobre una pantalla distante está rebordeada por bandas o

colocan los objetos cuyas sombras se van a observar a medio camino entre la fuente y la pantalla. Así es como se hizo el montaje para obtener las fotografías originales que se reproducen en la fig. 24A. Es una fotografía de la luz difractada por un alfiler, una tuerca hexagonal, un trozo de malla de alambre, un tornillo y una rodana.

24.1 Teoría ondulatoria de la luz de Huygens. La teoría ondulatoria de la luz fue propuesta primero por un físico inglés,

Robert Hooke, en 1665, y mejorada veinte años más tarde por el científico y matemático holandés Christian Huygens.*

Todos hemos tirado alguna vez una piedra a un estanque tranquilo de agua y observado las ondas que se extienden lentamente hacia afuera en círculos concéntricos y siempre crecientes. Ver la fig. 19I.

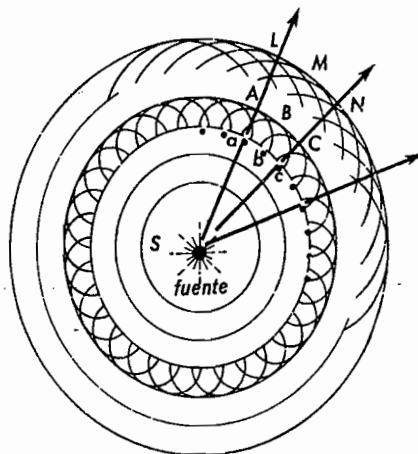


Fig. 24B. Diagrama de ondas que se extienden desde una fuente puntual. Las onditas secundarias y los nuevos frentes de onda ilustran el principio de Huygens.

En el caso análogo de una fuente puntual de luz, las ondas crecientes forman esferas concéntricas moviéndose hacia afuera con una velocidad extremadamente alta, de 300 000 km/seg o 18 300 mi/seg. Esto se representa diagramáticamente en la figura 24B. Cada círculo representa la cresta de una onda de modo que la distancia en-

tre círculos consecutivos es una longitud de onda.

Conforme al principio de Huygens, cada punto del frente de una onda puede considerarse como un nuevo punto productor de ondas. Considerando cada uno de los puntos a, b, c , etc., como otra fuente puntual, igual a S , se extienden simultáneamente ondas secundarias como se dibujan en la figura. Un instante después, la envolvente de éstas es el nuevo frente de onda A, B, C , etc., y todavía después el frente de onda es L, M, N , etc. Aunque el principio de Huygens puede parecer al principio un juego inútil con círculos, tiene aplicación general a muchos fenómenos ópticos.

En la fig. 24C se ilustra una demostración experimental directa del principio de

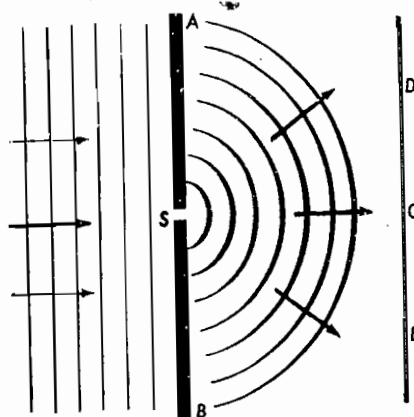


Fig. 24C. Diagrama de la difracción de las ondas en una pequeña abertura. El principio de Huygens.

Huygens. Las ondas planas que llegan a la barrera AB , desde la izquierda, son reflejadas o absorbidas en todos los puntos, excepto en S , donde se les permite pasar al otro lado. Cuando se efectúa el experimento con ondas de agua, se pueden ver las ondas extendiéndose en todas direcciones como si S fuera una fuente puntual. Las líneas representan crestas de ondas a una longitud de onda de separación.

24.2 Experimento de Young de la doble ranura. La prueba crucial entre la teoría corpuscular de Newton y la teoría ondulatoria de Huygens llegó en 1801 cuando Thomas Young efectuó su famoso experimento de interferencia. Este se representa esquemáticamente en la fig. 24D. La luz

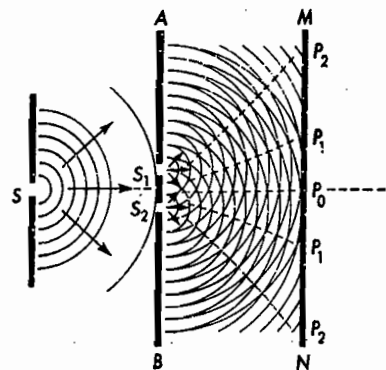


Fig. 24D. Diagrama del experimento de Young de la doble ranura ilustrando la interferencia de las ondas luminosas.

solar que entra por un agujero de alfiler, S , se hace incidir sobre una pantalla distante que contiene dos agujeros de alfiler S_1 y S_2 . Los dos juegos de ondas esféricas que emergen de los dos agujeros se interfieren entre sí, de tal modo que forman un esquema simétrico de franjas sobre otra pantalla MN . Este experimento es considerado ahora como la primera prueba definitiva de que la luz es un movimiento ondulatorio.

Por conveniencia se acostumbra repetir el experimento de Young con ranuras estrechas en lugar de agujeros de alfiler. Si S, S_1 y S_2 de la fig. 24D representan el corte transversal de tres ranuras angostas, la luz que cae en la pantalla MN , más distante, tiene la apariencia de franjas o bandas equidistantes como se muestran en la fotografía de la fig. 24E. Las franjas brillantes corresponden a los puntos P_0, P_1, P_2 , etc., y las franjas oscuras a los puntos intermedios.

Conforme las ondas viajan alejándose de cada ranura S_1 y S_2 , las crestas se cru-

zan una a otra sólo en puntos que están a lo largo de las líneas de trazos que se señalan en el diagrama. Éstas siguen los puntos donde las crestas de las dos ondas se juntan y producen una brillantez máxima. Entre estas líneas de puntos, existen otras que siguen los puntos donde la cresta



Fig. 24E. Franjas de interferencia producidas por una doble ranura, como en el experimento de Young.

de una onda y el valle de la otra se anulan entre sí y produciendo oscuridad. Este fenómeno se llama interferencia; donde las franjas son brillantes hay interferencia constructiva y donde son oscuras hay interferencia destructiva.

24.3 Medición de la longitud de onda de la luz. Se puede obtener una fórmula para la longitud de onda de la luz a partir del experimento de Young de la doble ranura como se demuestra en la fig. 24F.

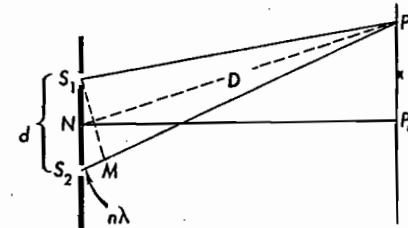


Fig. 24F. Relaciones geométricas en el experimento de la doble ranura.

Sea P la posición de una franja brillante en la pantalla y x su distancia desde la franja central P_0 , que se encuentra en la bisectriz perpendicular de la doble ranura S_1 y S_2 . Se dibuja una línea recta de cada ranura al punto P y, con un compás con radio S_1P , se inscribe el arco de

círculo S_1M . Con esta construcción se hace que la línea MP sea igual a S_1P y la línea corta S_2M resulta la distancia extra que debe viajar la luz de la ranura inferior. Para que se produzca una franja brillante en P , el intervalo S_2M debe ser igual a una longitud de onda completa, o a dos longitudes de ondas completas, etc., pues sólo así pueden llegar en fase las ondas de S_1 y S_2 a P . Por tanto, S_2M debe ser igual a $n\lambda$, donde n es un número entero, n igual a 0, 1, 2, 3, 4, etc., y λ es la longitud de onda de la luz.

Ya que la distancia d entre los centros de las ranuras es extremadamente pequeña en comparación con la distancia D a la pantalla, se puede considerar como recta la distancia S_1M y en ángulo recto con las tres líneas S_1P , NP y S_2P . Teniendo los lados correspondientes perpendiculares entre sí, los triángulos S_1S_2M y NPP_0 son semejantes. Por el conocido teorema de que los lados correspondientes de triángulos semejantes son proporcionales

$$\frac{n\lambda}{d} = \frac{x}{D}$$

$$\lambda = \frac{xd}{nD} \quad (24a)$$

Si llamamos x_1 a la distancia de la franja central a la primera franja, entonces $n=1$, y la ecuación queda de este modo.

$$\lambda = x_1 \frac{d}{D} \quad (24b)$$

Debido a que las franjas están uniformemente espaciadas, x_1 representa la equidistancia en todo el espectro. Midiendo las tres distancias d , x y D se puede calcular la longitud de onda de la luz. Numerosos experimentos repetidos cuidadosamente han dado los resultados contenidos en la Tabla 24A.

Ya que el espectro completo de la luz blanca es una banda continua, cada color tiene varias longitudes de onda. La luz

TABLA 24A. LONGITUD DE ONDA DE LA LUZ VISIBLE

Color	Longitud de onda	Promedio
Rojos	0.000070 cm	6.6×10^{-5} cm
Naranja	0.000062 cm	6.1×10^{-5} cm
Amarillo	0.000060 cm	5.9×10^{-5} cm
Verde	0.000058 cm	5.4×10^{-5} cm
Azul	0.000050 cm	4.7×10^{-5} cm
Violeta	0.000044 cm	4.2×10^{-5} cm

violeta, por ejemplo, varía desde 0.000040 centímetros a 0.000044 cm, mientras que la luz roja varía de 0.000062 a cerca de 0.000070 cm.

Como se muestra en la fig. 24G, la luz violeta del espectro visible está compuesta de las ondas más cortas, mientras que la

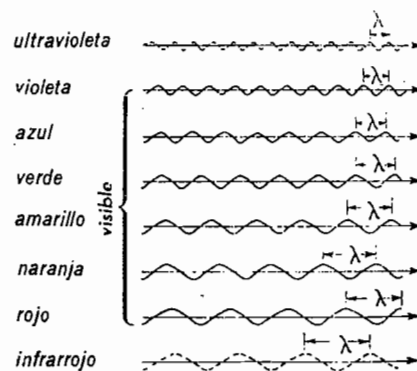


Fig. 24G. Diagrama mostrando las longitudes de onda relativas de la luz.

roja está compuesta por las más largas. Más allá del extremo violeta del espectro se encuentran ondas invisibles de luz de más corta longitud de onda aún, llamadas ultravioleta y al otro lado, en el extremo rojo del espectro, hay ondas de luz invisi-

ble más largas, llamadas infrarrojas. Ver la fig. 32A.

24.4 Interferómetro de Michelson. El interferómetro de Michelson es un aparato óptico que emplea el principio de la interferencia de dos haces de luz. Su estudio aquí es importante porque históricamente fue lo que llevó a la teoría de la relatividad de Einstein.

La forma del interferómetro de Michelson, como se le encuentra generalmente en los laboratorios científicos, es la mostrada en la fig. 24H. Las partes ópticas son

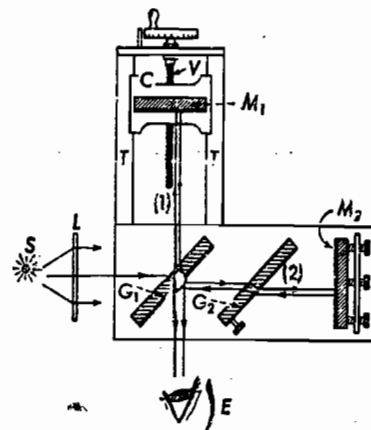


Fig. 24H. Diagrama de Interferómetro de Michelson

dos espejos, M_1 y M_2 , y dos placas paralelas de vidrio, G_1 y G_2 . La parte trasera de la placa G_1 suele estar ligeramente plateada (indicado con línea gruesa en la figura) para que la luz que viene de la fuente S se divida en: 1) un haz reflejado y 2) uno transmitido de igual intensidad. La luz que regresa del M_1 pasa por G_1 una tercera vez antes de llegar al ojo. La luz que regresa de M_2 se refleja en G_1 hacia el ojo. El objeto de la placa G_2 es hacer de igual longitud el recorrido de los dos rayos a través del vidrio.

El espejo M_1 se monta sobre una guía firmemente construida y puede moverse a lo largo de ella lentamente por medio de un tornillo, V . Cuando el espejo M_2 se

hace exactamente perpendicular a M_1 , por los tornillos de su cara posterior, se pueden ver o fotografiar en E franjas de interferencia similares a las que se encuentran con dobles ranuras. En la fig. 24I se presentan fotografías de franjas típicas para diferentes distancias del espejo M_1 .

Cuando se usa luz de una sola longitud de onda y los espejos están exactamente ajustados, se observan franjas circulares como las de las fotos (a) y (b). Si los espejos no están exactamente en ángulo recto entre sí, se obtienen franjas como las de las fotos (c) y (d). Si se observan

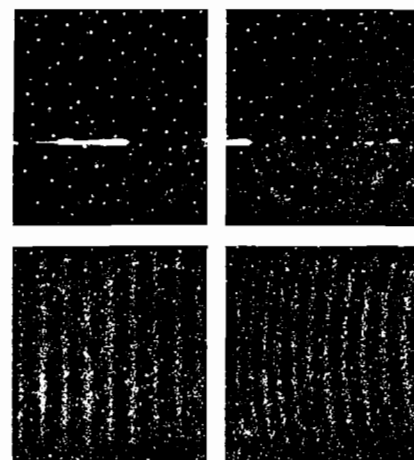


Fig. 24I. Espectros de franjas de interferencia fotografiadas con un interferómetro de Michelson.

franja circular y el espejo M_1 se mueve lentamente a lo largo de la guía por medio del tornillo V , el espectro de franjas circulares se expande o contrae; si se expande, aparecerán nuevas franjas, primero como un punto en el centro que se ensanchan y expande formando un círculo; y si se contrae, las franjas se achican, se hacen un punto y desaparecen en el centro. Si se observan franjas rectas o curvadas, el movimiento de M_1 hace que las franjas corran por el campo en ángulo recto con su dirección.

La expansión, contracción o corrimiento del espectro a una distancia de una franja

corresponde a un movimiento de M_1 de exactamente media longitud de onda de la luz. Cuando M_1 se mueve una distancia de $1/2$ de λ , el camino total de la luz (1) aumenta una longitud de onda entera. Si M_1 se mueve 1λ el espectro se mueve dos franjas porque el camino total (1) ha cambiado en 2λ . Cualquier franja brillante que se observe es causada por los dos haces que se reúnen en fase. Cuando se cambia el camino en $1/2$ de λ , 1λ , $3/2$ de λ , etc., los dos haces que llegan al mismo punto del campo estarán de nuevo en fase.

Contando el número de franjas necesarias para mover el espejo M_1 cierta distancia, puede calcularse la longitud de onda de la luz. Esto parece ser el más exacto método para medir longitudes de onda de la luz de diferentes fuentes. Sabiendo la longitud de onda exacta de cierta fuente de luz, puede uno usar el interferómetro para medir distancias con gran precisión.

Por medio del interferómetro de Michelson se ha determinado el metro patrón en función de la longitud de onda de la luz naranja, $\lambda = 6,057.80 \times 10^{-7}$ metros, de una lámpara de argón.*

24.5 Velocidad de la luz en materia en movimiento. En 1859 el físico francés Fizeau midió la velocidad de la luz en una corriente de agua y encontró que la luz era arrastrada por la corriente. En la fi-

gura 24J se presenta un esquema del aparato usado.

La luz de una fuente monocromática, S , se separa en dos haces mediante una lente, L_1 . Estos dos haces pasan por los tubos A y B que contienen agua fluyendo rápidamente en direcciones opuestas. Después de la reflexión en M , los haces atraviesan por tubos opuestos de modo que al llegar a L_1 una ha cruzado las corrientes A y B en la dirección del flujo y el otro las ha cruzado a las dos contra el flujo.

Si la luz viaja más aprisa en un recorrido que en el otro, el tiempo será diferente y se correrán las franjas en S' , donde se juntan los haces. Usando tubos de 1.5 metros de largo y agua a una velocidad de 7.0 m/seg, Fizeau encontró un corrimiento de 0.46 de franja por la inversión de la corriente de agua. Este corrimiento corresponde a una disminución de velocidad de la luz en una dirección y un aumento en la otra, de cerca de una mitad de la velocidad del agua. En otras palabras, el agua en movimiento tiene un efecto de arrastre sobre las ondas de luz.

En 1818, el físico francés Fresnel, obtuvo una fórmula para este efecto de arrastre, basado en la existencia de lo que entonces se llamó el éter. Su fórmula da v' , el aumento de velocidad de la luz en medio, debido al movimiento.

$$v' = v \left(1 - \frac{1}{\mu^2} \right) \quad (24c)$$

donde v es la velocidad del medio y μ es el índice de refracción. Para el agua, con un índice de refracción de 1.33, $v' = 0.43v$,

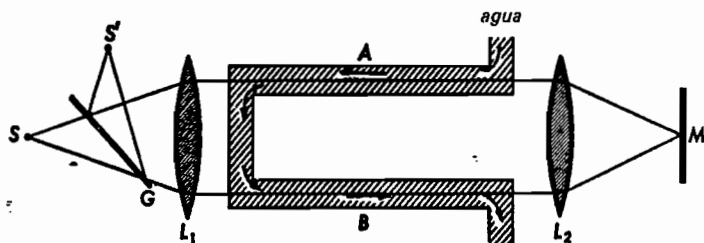


Fig. 24J. Experimento de Fizeau para medir la velocidad de la luz en un medio en movimiento.

que corresponde razonablemente bien con las observaciones de Fresnel.

24.6 La polarización de la luz. Los experimentos descritos en las primeras secciones de este capítulo, ilustrando la difracción y la interferencia de la luz, se consideran generalmente como prueba de que la luz es un movimiento ondulatorio. Aunque estos experimentos capacitan a los científicos a medir cuidadosamente la longitud de onda de la luz, no dan información sobre la clase de ondas que intervienen. La razón de ello es que todos los tipos de ondas, bajo las condiciones adecuadas, presentarán difracción e interferencia. Ver la Sec. 19.8 sobre la interferencia de las ondas sonoras.

La información deseada en el caso de las ondas de luz se encuentra en otro grupo de fenómenos conocidos como de luz polarizada. Los fenómenos, que se describirán en este capítulo, son considerados como prueba de que la luz es un movimiento ondulatorio transversal en contraste con el movimiento ondulatorio longitudinal del sonido.

Se puede lograr una mejor comprensión de los experimentos siguientes presentando primero los métodos gráficos de representación de ondas transversales. Suponemos, desde un principio, que cada onda de luz es una onda transversal, cuyas vibraciones siguen líneas rectas perpendiculares a la dirección de propagación. Además suponemos que un haz de luz ordinaria consiste en millones de estas ondas, cada una

con su propio plano de vibración y habiendo ondas vibrando en todos los planos con igual probabilidad. Viendo un haz de éstos de frente, en la dirección en que viene, como en la fig. 24K, debe haber el mismo número de ondas vibrando en cualquier plano. Esto se puede expresar como una simetría perfecta.

Si, por un medio u otro, todas las ondas de un haz de luz se hacen vibrar en planos paralelos, se dice que la luz está polarizada en un plano. En la fig. 24L se ilustra este

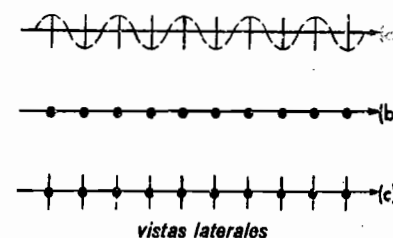


Fig. 24L. Diagramas ilustrando rayos de luz polarizados en un plano.

tipo de luz. El diagrama superior (a) representa luz polarizada en un plano viajando hacia la derecha y vibrando en un plano vertical, mientras que el segundo diagrama (b) representa un rayo de luz polarizada en un plano vibrando en un plano horizontal. La línea punteada, indicando las ondas en el diagrama (a), generalmente se omite.

Se puede probar que un haz de luz ordinaria no polarizada, vibrando en todos los planos, puede considerarse formada por dos clases únicas de vibraciones, la mitad de las ondas vibrando en un plano vertical, como en el diagrama (a), y la otra mitad vibrando perpendicularmente a aquellas, como en el diagrama (b). El diagrama (c), por tanto, representa luz ordinaria no polarizada.

24.7 Doble refracción. La doble refracción de la luz por el espato de Islandia (calcita) fue observado por primera vez por un físico sueco, Erasm Bartholinus, en 1669, y después fue estudiado en detalle

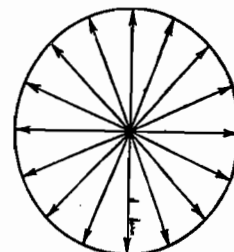


Fig. 24K. Vista de frente de un haz de luz no polarizada, ilustrando esquemáticamente la igual probabilidad de todos los planos de vibración.

por Huygens y Newton. Ahora se sabe que casi todas las sustancias cristalinas presentan este fenómeno. Los siguientes son unos cuantos ejemplos de cristales que muestran este efecto: *calcita*, *cuarzo*, *mica*, *azúcar*, *topacio*, *selenita*, *aragonita* y *hielo*. La calcita y el cuarzo son de particular importancia porque se usan ampliamente en la manufactura de instrumentos ópticos especiales.

La calcita, como se encuentra en la naturaleza, tiene siempre la forma característica mostrada en la fig. 24M (a).

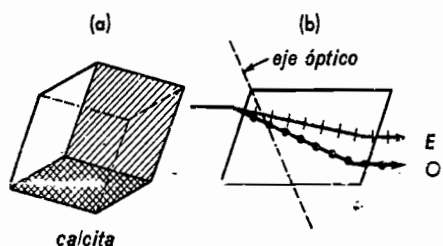


Fig. 24M. Diagramas de calcita y su comportamiento con la luz.

La luz que sufre doble refracción en la calcita, produce dos rayos polarizados en un plano. Uno de ellos, llamado el *rayo ordinario*, está polarizado con sus vibraciones en un plano, y el otro, llamado *rayo extraordinario*, está polarizado, con sus vibraciones, en un plano perpendicular al primero. En la figura se indican estas polarizaciones con *puntos* y *líneas*, y se puede probar con *película polarizante*. Este último accesorio se describirá en las siguientes dos secciones.

Ya que las dos caras opuestas del cristal de calcita son siempre paralelas, los dos rayos refractados emergen paralelos al rayo incidente y por tanto paralelos entre sí. Cuando la luz incidente llega perpendicularmente a la superficie del cristal, como en la fig. 24N, el rayo extraordinario será refractado alejándose de la normal y saldrá paralelo, pero desplazado del haz incidente, y el rayo ordinario pasará rectamente a través del cristal, sin ninguna desviación.

En general, el rayo *O* obedece las leyes ordinarias de la refracción; es decir, obedece la ley de Snell. En esto, el cristal actúa como el vidrio o el agua. El rayo *E* no obedece ninguna ley simple, se comporta bastante anormal y no obedece la Ley de Snell.

En otras palabras, el rayo *O* viaja con la misma velocidad sin importar su dirección al atravesar el cristal, mientras que la

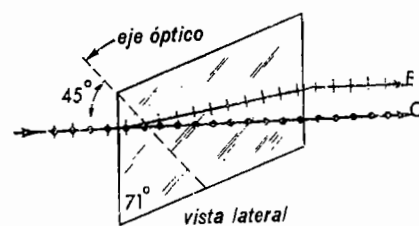


Fig. 24N. Sólo un rayo obedece la ley de Snell en la doble refracción.

velocidad del rayo *E* es distinta en diferentes direcciones. De ahí vienen las designaciones de rayos ordinario y extraordinario. El eje óptico de un cristal es la única dirección, indicada con línea punteada en la fig. 24N, en que las vibraciones viajan con la misma rapidez, y no hay doble refracción.

24.8 Polarización por absorción selectiva. Cuando la luz ordinaria entra a un cristal de turmalina, ocurre la doble refracción en una forma muy semejante a la ocurrida en la calcita, pero con esta diferencia: un rayo, el llamado rayo *O*, es absorbido enteramente por el cristal, mientras que el otro rayo, el rayo *E*, sale adelante. Este fenómeno es llamado *absorción selectiva*, porque el cristal absorbe las ondas de luz que vibran en un plano y no absorbe a las que vibran en el otro.

Los cristales de turmalina absorben la luz ordinaria, eliminan las vibraciones *O* y transmiten luz polarizada en un plano, como se ilustra en la fig. 24O (a). Cuando se alinean paralelos dos cristales de éstos, uno detrás del otro, la luz polarizada en un plano que sale del primer cristal, pasa

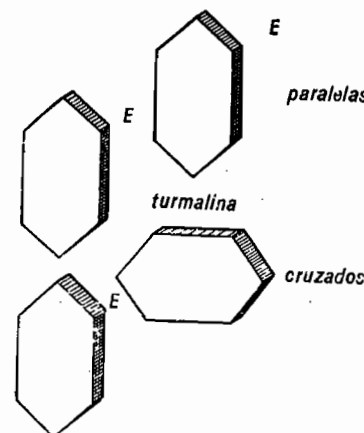


Fig. 24O. Los cristales de turmalina polarizan la luz.

por el segundo con muy poca pérdida de intensidad. Si uno de los cristales se gira a 90° con respecto al otro, en la *posición cruzada*, la luz es absorbida completamente y no pasa al otro lado.

El comportamiento de la turmalina y de otras sustancias ópticamente similares, se debe a la estructura molecular del cristal. Para presentar una analogía, las moléculas usualmente espaciadas de un cristal son como los árboles regularmente espaciados en una plantación. Si uno trata de correr entre las filas de árboles llevando un palo muy largo sostenido en ángulo recto con la dirección del movimiento, tendrá que llevar el palo verticalmente. Si se sostiene en el plano horizontal, el corredor quedará detenido.

La sustancia que produce resultados más satisfactorios en este sentido, es un material manufacturado en forma de película muy delgada. Esta película tiene la apariencia general de un plástico y se fabrica con pequeños cristales aciculares de un compuesto orgánico *yodosulfato de quinina*. Alineados paralelamente e incrustados en *pasta de nitrocelulosa*, actúan como la turmalina, absorbiendo un componente de la polarización, y transmitiendo el otro.

Se muestran dos películas de éstas, montadas separadamente entre placas delgadas

de vidrio, en la fig. 24P. En la posición cruzada, no puede pasar luz a través de las dos películas, mientras que en la posición paralela se transmite luz blanca vibrando en el plano indicado por las líneas paralelas. Las películas polarizadoras de esta clase encuentran muchas aplicaciones prácticas, sobre todo donde no se desean destellos de luz reflejada. La luz de los destellos, reflejada en ángulo recto desde la cubierta de una mesa, de un libro, una vidriera de ventana, del agua o del camino adelante de un auto, es luz polarizada y puede eliminarse parcialmente con películas polarizantes.

24.9 La dispersión y el azul del cielo. El azul del cielo y el rojo de las puestas de Sol, se debe a un fenómeno llamado dispersión. Cuando la luz pasa a través de la atmósfera de la Tierra, las moléculas de aire recogen mucha luz y vuelven a emitirla en alguna otra dirección. El efecto es bastante parecido a la acción de las ondas de agua sobre los objetos flotantes. Si, por ejemplo, las ondas producidas por una piedra que se deja caer en un estanque de

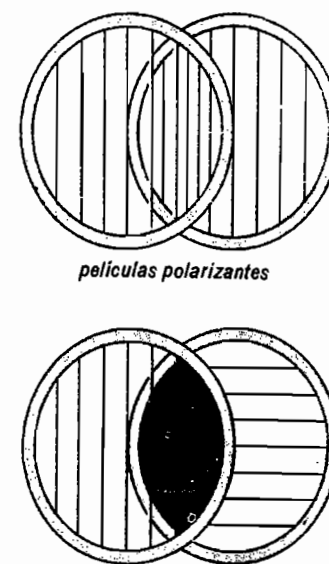


Fig. 24P. Películas polarizantes en posiciones paralelas y cruzadas.

agua, encuentran un pequeño corcho flotando en la superficie, hacen que el corcho suba y baje con la frecuencia de las ondas que pasan.

Se puede imaginar a la luz actuando en la misma forma sobre las moléculas de aire y las pequeñas partículas de polvo. Una vez que son puestas en vibración por una onda de luz, las moléculas o partículas pueden volver a emitir la luz absorbida, a veces en la misma dirección, pero generalmente en cualquiera otra. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 24Q. En

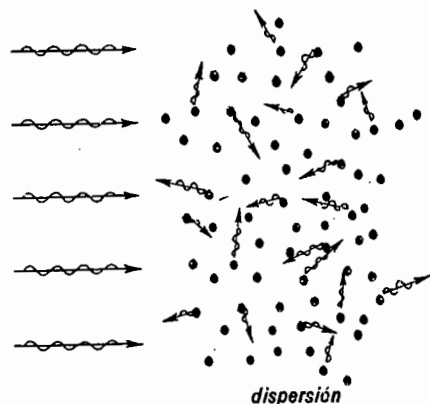


Fig. 24Q. Las ondas de luz son dispersadas por las moléculas de aire.

el diagrama (a), se ven las ondas luminosas dispersadas al azar, en todas direcciones.

Experimentalmente se ve, de acuerdo con la teoría de la dispersión, que las ondas más cortas son dispersadas más fácilmente que las ondas más largas. Para ser más exactos, la dispersión es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de la onda.

$$\text{dispersión} = k \frac{1}{\lambda^4} \quad (24d)$$

De acuerdo con esta ley, las ondas cortas de la luz violeta son dispersadas diez veces más fácilmente que las ondas largas

de la luz roja. Los otros colores son dispersados en proporciones intermedias entre éstas. Así, cuando la luz del Sol entra en la atmósfera de la Tierra, la luz violeta y azul es dispersada al máximo, seguida por el verde, amarillo, anaranjado y rojo en el orden mencionado. Por cada diez ondas violeta dispersadas de un haz, sólo se dispersa una onda roja.

rojo	naranja	amarillo	verde	azul	violeta
1	2	3	5	7	10

En un día claro, al mediodía, cuando el Sol está en el cenit, todo el cielo se ve azul claro, como se ilustra con un observador en A de la fig. 24R. Este es el co-

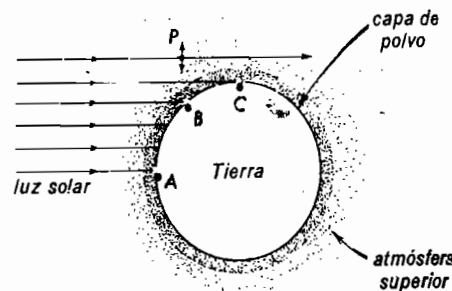


Fig. 24R. La dispersión de la luz solar en la capa de polvo cercana a la superficie terrestre hace que el Sol se vea amarillo; luego anaranjado y después rojo al ocultarse.

lor compuesto por la mezcla de colores dispersados más eficientemente por las moléculas del aire. Como se indica con los colores del espectro de la parte inferior derecha de la fig. 22F, el azul claro, como el azul verdoso, del triángulo de los colores, se obtiene por la mezcla aditiva del violeta, azul, verde y amarillo.

24.10 El atardecer rojo. La observación ocasional de una puesta de Sol rojo anaranjado, se atribuye a la dispersión de la luz por las partículas finas de polvo y humo cercanas a la superficie de la Tierra. Esto se ilustra en la fig. 24R. Para un observador en el punto A, es mediodía y la luz solar que cae verticalmente, visible

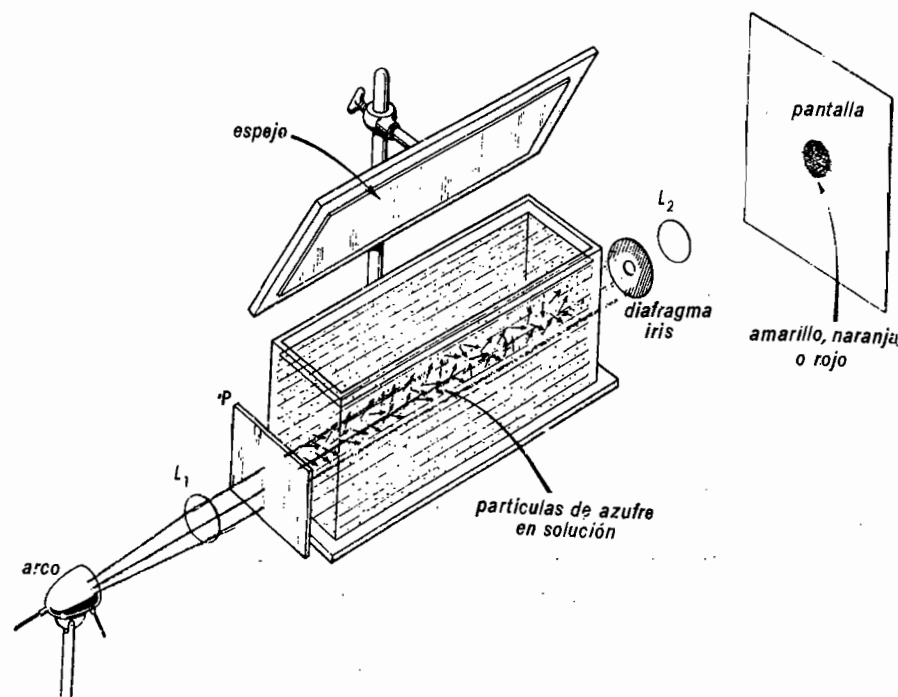


Fig. 24S. Experimento de la puesta del Sol. Demostración de la dispersión y polarización de la luz por las partículas pequeñas.

sólo mirando directamente hacia el Sol, avanza una distancia relativamente corta a través del polvo. Como consecuencia de ello, se dispersan poco el violeta y el azul y el Sol se ve blanco. En cambio al acercarse la puesta de Sol, la luz solar directa tiene que viajar por una trayectoria cada vez más larga a través del polvo. El resultado es que cuando falta cerca de una hora para que se ponga el Sol, estando el observador en B, se dispersan prácticamente todo el azul y violeta y, por los colores restantes, rojo, naranja, amarillo y un poco de verde, el Sol se ve amarillo. Al ocultarse el Sol, cuando el observador está en C, los rayos directos deben viajar a través de tantos kilómetros de partículas de polvo que son dispersados completamente todos los colores, excepto el rojo, y el Sol

se ve rojo. En este mismo momento, el cielo se ve sobre el observador todavía azul claro. Si la capa de polvo es demasiado densa, aún el rojo será dispersado apreciablemente y el Sol, cada vez de un rojo más oscuro, se perderá de vista antes de que llegue al horizonte.

En la fig. 24S se ofrece una excelente demostración de la dispersión producida por las partículas finas. Un haz de rayos paralelos de luz blanca procedente de un arco de carbón y de una lente, L_1 , pasa por un recipiente de vidrio lleno de agua. Después de atravesar el agua, con un diafragma iris en el otro extremo y una segunda lente, L_2 , se forma una imagen de la abertura circular en la pantalla.*

* Para producir las partículas finas para la dispersión, se disuelven unos 40 gm de fijador foto-

Se desarrollan pequeñas partículas de azufre durante un período de 5 a 10 min. Durante este tiempo el haz que pasa por el tanque se vuelve de un azul celeste, mientras que el disco circular de luz cam-

gráfico (hiposulfito de sodio) en unos 7 litros de agua. Luego se agregan 1 ó 2 cm³ de ácido sulfúrico concentrado y se mezclan perfectamente. La cantidad correcta para producir el mejor resultado se determina por varias pruebas. La primera precipitación visible debe aparecer después de 2 ó 3 minutos.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Qué es la difracción? ¿Qué es la interferencia?

2. ¿Cómo es el experimento de Young de la doble ranura? Hágase un diagrama del experimento.

3. ¿Cómo puede determinarse la longitud de onda de la luz usando el experimento de Young de la doble ranura?

4. ¿Cómo son las ondas transversales? ¿Qué se entiende por luz no polarizada?

5. ¿Qué es la luz polarizada en un plano? ¿Cómo se descompone la luz no polarizada en dos componentes polarizados en un plano?

6. ¿Qué es la doble refracción? ¿Cuál es la naturaleza de la luz en los rayos refractados?

7. ¿Obedecen los rayos *O* y *E* la ley de Snell? ¿Es posible obtener sólo un rayo refractado en un cristal como la calcita?

8. ¿Qué es la absorción selectiva? ¿Qué es el Polaroid? ¿Dónde se usa el Polaroid? ¿Qué es la turmalina?

9. ¿Qué es la dispersión? ¿Cómo varía la dispersión con la longitud de onda de la luz? ¿Cómo varía la dispersión con el color?

10. ¿Por qué es azul el cielo? Si se dispersa más el violeta que el azul, ¿por qué se ve el cielo azul en vez de violeta?

11. ¿Por qué el Sol poniente cambia de blanco a amarillo, naranja y rojo? Explícarlo.

12. Se usa luz verde de longitud de onda de 5×10^{-5} cm para observar las franjas de interferencia producidas con una doble ranura.

bia de blanco a amarillo, a naranja y a rojo.

Si se observa el azul por una pieza de Polaroid en la dirección que forma ángulo recto con los rayos del Sol, se encuentra que la luz está polarizada en un plano. Esta polarización puede verse también en el experimento descrito arriba. Observando a través de una película de Polaroid, el haz, dentro del tanque, aparece brillante en una orientación del Polaroid y obscurce con una rotación de 90° .

nura. Si los centros de las ranuras están a 0.05 cm de separación y la distancia a la pantalla de observación es 200 cm, ¿cuánto es el espaciado de las franjas?

13. Cae luz violeta con longitud de onda de 4×10^{-5} cm en una doble ranura y luego llega a una pantalla blanca a 2 m de distancia, formando franjas de interferencia con 1.5 mm de separación. Calcular la separación entre las dos ranuras. (Resp. 0.533 milímetros.)

14. Una doble ranura recibe luz de una sola longitud de onda. La distancia entre los centros de las dos ranuras es de 0.8 mm, y la distancia entre las franjas consecutivas en la pantalla que está a 4 m, es de 0.305 centímetros. a) ¿Cuánto es la longitud de onda?; b) ¿cuál es el color de la luz?

15. ¿Cuál es la relación de dispersión de las ondas de luz entre luz roja de 7×10^{-5} cm de longitud de onda y luz violeta de 4×10^{-5} cm de longitud de onda? (Resp. 1:9.4.)

16. Por cada 200 ondas de luz roja dispersada en el aire, ¿cuántas ondas de luz verde se dispersarán? Considerar las longitudes de onda de 7×10^{-5} y 5×10^{-5} cm, respectivamente.

17. Calcular la relación de los números de rayos de luz dispersados por el aire para luz violeta ($\lambda = 4 \times 10^{-5}$ cm) y luz verde ($\lambda = 5 \times 10^{-5}$ cm). (Resp. 2.44:1.)

18. Encontrar la relación de ondas de luz dispersadas por partículas finas entre luz azul ($\lambda = 4.2 \times 10^{-5}$ cm) y luz roja ($\lambda = 6.6 \times 10^{-5}$ cm.)

25

RELATIVIDAD

La simple mención de la palabra relatividad sugiere el nombre de Alberto Einstein,* el científico a quien debemos esta famosa teoría. Para iniciar este capítulo diremos que Einstein fue realista y que su teoría se basa en hechos físicos que se han comprobado por repetidas observaciones de experimentos bien planeados y ejecutados. El primero de éstos es el famoso *experimento Michelson-Morley*.

25.1 El experimento Michelson-Morley. Este experimento, el más famoso en óptica, fue realizado primero en 1881 por los dos científicos norteamericanos, Michelson y Morley, tratando de detectar el movimiento de la Tierra en el espacio. Si la transmisión de la luz a través del espacio requiere un éter, es decir, un medio por el cual se pueda mover, entonces la luz debe ser arrastrada por este éter al moverse la Tierra en el espacio. A fin de detectar este

arrastre, se usó el interferómetro de Michelson por resultar lo más sensible. Ver la fig. 24H.

En principio, la prueba del arrastre del éter consistió simplemente en observar si hay algún cambio de las franjas de interferencia de la luz en el interferómetro de Michelson cuando todo el instrumento se hace girar un ángulo de 90° . Supongamos que el interferómetro y la Tierra están en reposo y que el éter se está moviendo con una velocidad *v*, como se indica en la figura 25A. Si no hay ningún arrastre efec-

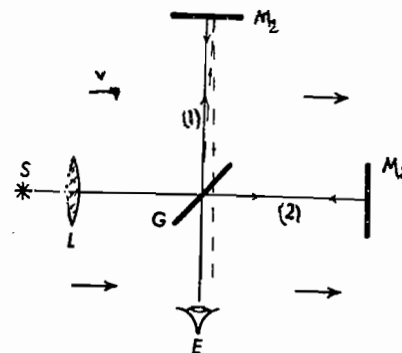


Fig. 25A. Montaje del interferómetro de Michelson para detectar el arrastre del éter.

tivo del éter, los caminos seguidos por la luz, (1) y (2), irán y volverán como se representa con las líneas llenas y las flechas y se observará un juego de bandas de interferencia como las mostradas en la fig. 24H (c).

Si ahora suponemos que la luz es arrastrada por el éter, resultará que el tiempo que necesita la luz para el camino transversal (1), en ángulo recto con la corriente

* Alberto Einstein (1879-1955), físico suizo-alemán, nacido de padres judíos de Ulm, Wurtemberg, el 14 de marzo de 1879. Su infancia la pasó en Munich, donde su padre, vendedor de drogas, se había instalado en 1880. Cuando la familia viajó a Italia, en 1894, el joven Alberto fue a estudiar a Suiza. Allí se ganó la vida mientras estudiaba, llegando a obtener el grado de doctor en Filosofía en la Universidad de Zurich en 1909, y en 1913 lo nombraron director del Instituto Kaiser Guillermo, de Física, de Berlín. En este puesto, fue electo miembro de la Academia Prusiana de Ciencias y de la Real Academia de Londres. En 1921 recibió el Premio Nobel en Física, y en 1925 la Medalla Copley de la Real Sociedad Británica. Fue ampliamente conocido por su teoría de la relatividad, la teoría y explicación del movimiento browniano, la teoría del efecto fotoeléctrico y la teoría de la derivación de la ecuación de masa y energía $E = mc^2$. Casado dos veces, Einstein tuvo varios hijos. Según sus amigos fue un hombre tranquilo, sincero y modesto que amaba su violín y su pipa, pero a quien le disgustaba el ceremonial.

de éter, y el tiempo que necesita para recorrer el camino (2), primero a favor de la corriente y luego en contra, serán incrementados en cantidades diferentes.

Un arrastre del éter causará, por tanto, un cambio de las franjas observadas en el interferómetro. Ya que no se puede detener ni a la Tierra ni al éter, se recurrió a una rotación de 90° del interferómetro

mercurio, y las observaciones de las franjas se siguieron haciendo mientras se hacía girar lenta y continuamente en torno a su eje vertical.

Si suponemos que la velocidad del éter, v , es de 30 km/seg (la velocidad de la Tierra a lo largo de su órbita en torno al Sol), y que la velocidad de la luz, c , es de 300 000 km/seg, debería observarse un co-

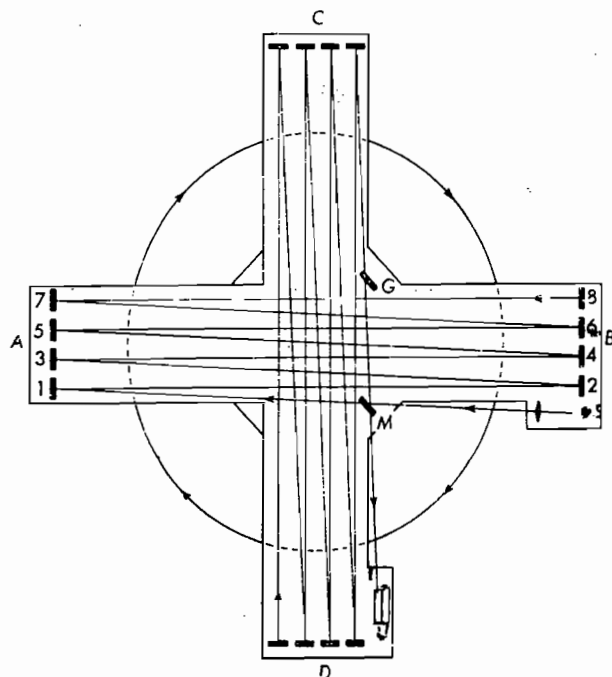


Fig. 25B. Montaje elaborado de Miller para usar el experimento de Michelson-Morley en detectar el arrastre del éter.

que debería tener un efecto similar. Intercambiando los caminos (1) y (2) se invierte la diferencia de tiempo $t_2 - t_1$ y se doblaría cualquier corrimiento de las franjas.

Michelson y Morley hicieron que los caminos de la luz fueran de 11 metros de largo; reflejando la luz hacia atrás y adelante en 16 espejos, como se ilustra en la fig. 25B. Para evitar distorsiones al girar el instrumento, se montó todo el aparato en una base de concreto que flotaba sobre

mercurio, y las observaciones de las franjas se siguieron haciendo mientras se hacía girar lenta y continuamente en torno a su eje vertical.

El hecho experimental de que no se observara ningún corrimiento de las franjas llevó a la conclusión de que, o bien no había tal arrastre del éter o que el interferómetro de Michelson era incapaz de detectar el movimiento de la Tierra en el espacio.

25.2 La contracción Lorentz-Fitzgerald. Desde que Michelson y Morley anunciaron los resultados negativos de su experimento del arrastre del éter, los científicos trataron de explicar por qué fracasaba el experimento. En 1890 fue presentada una explicación ingeniosa por Fitzgerald. Si los objetos que se mueven en el espacio tienen que empujar contra el éter inmóvil, sugería, resultarán comprimidos en la dirección del movimiento y, por tanto, esta compresión acortaría los brazos del interferómetro de Michelson que sostienen los espejos y podrían compensar exactamente cualquier arrastre del éter existente.

Lorentz,* el famoso físico holandés, estudió este problema desde un punto de vista atómico. Él propuso: toda la materia está formada de átomos y los átomos están formados por partículas cargadas que producen campos eléctricos y magnéticos. Estos campos deben ejercer fuerzas sobre el éter electromagnético y, por ello, han de hacer que los átomos y moléculas de la materia en movimiento se amontonen más cerca unas de otras. A partir de principios bien conocidos de electricidad y magnetismo, Lorentz derivó la siguiente fórmula para la longitud de cualquier objeto:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (25a)$$

donde v es la velocidad del objeto respecto al éter, l_0 es la longitud en reposo dentro del éter y c es la velocidad de la luz. Supóngase que un objeto está en reposo, de

* Hendrik A. Lorentz (1853-1928), físico holandés, nació en Arnhem el 18 de julio de 1853. Se educó en la Universidad de Leyden, donde fue nombrado profesor de física teórica a los 25 años de edad. Aquellos que lo conocieron, no perdieron nunca la oportunidad de mencionar su encantadora personalidad y su amable disposición. De sus numerosas contribuciones a la ciencia, es más conocido por: 1) un grupo de cuatro ecuaciones, conocidas como la transformación de Lorentz, que formó la base de la teoría especial de la relatividad de Einstein, y 2), por su explicación teórica del efecto Zeeman. En 1922 recibió, junto con Zeeman, el Premio Nobel de Física.

modo que $v=0$. Por la sustitución de $v=0$ en la ec. (25a), encontramos que $l=l_0$, que nos dice que la longitud del objeto l será justamente igual a su longitud en reposo l_0 . Si se estuviera moviendo una barra a lo largo con las tres cuartas partes de la velocidad de la luz, en cambio, la sustitución de $v=(3/4)c$ en la ecuación da $l=0.66 l_0$. Esto indica que la barra en movimiento es aproximadamente de las dos terceras partes de su longitud en reposo. Ver la fig. 25C.



Fig. 25C. Diagrama de la contracción de Lorentz-Fitzgerald.

Es interesante ver qué indica esta ecuación si la barra se mueve a lo largo con la velocidad de la luz, es decir, si $v=c$. El resultado es $l=0$. Esto significa que cualquier objeto que se mueva a la velocidad de la luz, se comprimirá a cero longitud. Por tanto, la velocidad de la luz resulta un límite máximo de la velocidad de cualquier objeto en movimiento.

La fórmula anterior, aplicada a los brazos transversales del interferómetro usado en el experimento de Michelson-Morley, muestra que los brazos se acortan justamente la cantidad necesaria para compensar el arrastre esperado. Ver la fig. 25B. Este acortamiento de un objeto es imposible de medir, porque, si se intenta medir la longitud de un objeto en movimiento, se necesita que el instrumento medidor se mueva a la misma velocidad y entonces se acorta el medidor en la misma proporción.

25.3 Teoría especial de la relatividad de Einstein. La relatividad se divide en dos partes. Una parte se llama la *teoría especial de la relatividad* y la otra la *teoría general*. La teoría especial, desarrollada por Einstein en 1905, es firmemente respal-

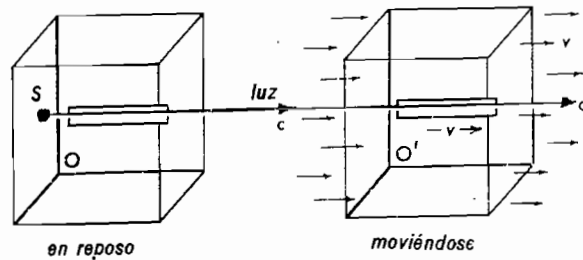


Fig. 25D. La velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, es decir, es invariante.

dada por numerosas observaciones experimentales de alta precisión y se refiere a los observadores y sus marcos de referencia en movimiento a velocidad constante. Las matemáticas empleadas en la teoría especial son bastante sencillas y nosotros consideraremos varias de las relaciones que son necesarias para la explicación satisfactoria de ciertos fenómenos atómicos.

La teoría general, propuesta por Einstein en 1915, se ocupa de los movimientos de cuerpos en marcos de referencia acelerados. Las matemáticas de la teoría general son bastante difíciles, y la evidencia experimental de su validez no está tan bien fundada como para la teoría especial. El fracaso del experimento Michelson-Morley para detectar el arrastre del éter fue interpretado por Einstein con el significado de que no podemos encontrar ningún cuerpo astronómico, ni ningún sistema de referencia, que esté en reposo en el espacio. Más aún, llegó a la conclusión de que la velocidad de la luz en el espacio libre se encontraría de igual valor sin importar el movimiento de la fuente o del observador. Otra manera de decir esto es diciendo que la velocidad de la luz es *invariante*.

Para ver el significado de esta afirmación, considérese un marco de referencia

y un observador O , en reposo como se indican en la fig. 25D. Se monta una fuente de luz, S , y, por medio de un experimento, se determina la velocidad de la luz y se encuentra que es 3×10^8 m/seg. Otro observador, O' , moviéndose con una velocidad y respecto a O , permite que la luz de la misma fuente pase por su aparato. Al medir la velocidad de la misma luz, en su marco de referencia, encuentra también 3×10^8 m/seg.

Einstein encontró necesario modificar las leyes del movimiento de Newton para que estos dos resultados idénticos fueran consistentes. Para esto supuso que la distancia y el tiempo eran relativos, es decir, que la distancia entre dos puntos, o el tiempo transcurrido entre dos acontecimientos, dependían del movimiento relativo del observador. Dos observadores moviéndose con diferentes velocidades medirían diferentes distancias y distintos tiempos.

25.4 Transformación relativista de la velocidad. Supongamos que un observador, O observa un aeroplano que se mueve con una velocidad u . Otro observador, O' , moviéndose hacia el primero, o alejándose de él, con una velocidad v , observa y mide la

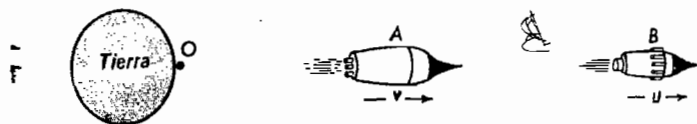


Fig. 25E. Diagrama de dos naves espaciales alejándose de la Tierra con velocidades constantes.

velocidad del mismo avión. La velocidad que él mide será u' , donde

Relatividad especial

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}} \quad (25b)$$

siendo c la velocidad de la luz.

Esta es la ecuación de la transformación de la velocidad en la teoría especial de la relatividad. Indica que diferentes observadores encontrarán distintas velocidades.

En la mecánica newtoniana, donde no se toman en cuenta los efectos de la relatividad, la ecuación de transformación es simplemente,

$$u' = u - v$$

Mecánica newtoniana

Ejemplo 1. Un observador en la Tierra ve una nave espacial, A , alejándose de él a 2×10^8 m/seg, y adelantándose a otra nave espacial, B , que se aleja a 1.5×10^8 m/seg. Encontrar la velocidad relativa de: *a*) la nave espacial B , según se observa desde A ; *b*) de la nave espacial A , según se observa desde B ; y *c*) de la nave espacial B respecto a la nave A , según se observa desde O .

Solución. Este ejemplo se muestra esquemáticamente en la fig. 25E. Las cantidades dadas para *a*) son: $v = 2 \times 10^8$ m/seg; $u = 1.5 \times 10^8$ m/seg; $c = 3 \times 10^8$ m/seg. Al sustituir en la ec. (25b) obtenemos para la parte *a*)

$$u' = \frac{1.5 \times 10^8 \text{ m/seg} - 2.0 \times 10^8 \text{ m/seg}}{1 - \frac{1.5 \times 10^8 \text{ m/seg} \times 2.0 \times 10^8 \text{ m/seg}}{(3 \times 10^8 \text{ m/seg})^2}}$$

$$u' = \frac{-0.5 \times 10^8}{1 - \frac{3 \times 10^{16}}{9 \times 10^{16}}} = -0.75 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

El observador en A ve que B se acerca a 0.75×10^8 m/seg. Para la parte *b*), invertimos los símbolos de las velocidades: $u = 2 \times 10^8$ m/seg, y $v = 1.5 \times 10^8$ m/seg. Por sustitución en la ec. (25b), obtenemos, para la parte *b*)

$$u' = \frac{2.0 \times 10^8 - 1.5 \times 10^8}{1 - \frac{2.0 \times 10^8 \times 1.5 \times 10^8}{(3 \times 10^8)^2}}$$

$$u' = \frac{0.5 \times 10^8}{1 - \frac{3 \times 10^{16}}{9 \times 10^{16}}} = +0.75 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

El observador en B advierte que A se acerca a 0.75×10^8 m/seg. Para la parte *c*) se toma sólo la diferencia entre las dos velocidades observadas por O .

$$u' = 1.5 \times 10^8 - 2.0 \times 10^8 = -0.5 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

El observador O ve a A y B acercándose uno a otro a razón de 0.5×10^8 m/seg.

Ejemplo 2. Supóngase que la nave espacial B del ejemplo 1 (fig. 25D) es reemplazada por un haz de luz moviéndose de izquierda a derecha, que es medida por el observador O y encuentra que es $c = 3 \times 10^8$ m/seg. ¿Cuál será la velocidad de esta misma luz observada desde la nave espacial A ?

Solución. Las cantidades dadas son: $u = c$; $v = 2.0 \times 10^8$ m/seg, y $c = 3 \times 10^8$ m/seg. Reemplazando primero u por c en la ec. (25b) y despejando u' , obtenemos,

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2} = \frac{c - v}{1 - cv/c^2} = \frac{c - v}{1 - v/c} = \frac{c - v}{c - v} = c$$

Por lo cual el observador en A encuentra la velocidad de la luz como c sin importar su velocidad. Y si la velocidad de la luz es la misma para todos los observadores, se dice que es invariante.

25.5 Masa relativista. La teoría especial de la relatividad dice que si la masa de un objeto es medida por dos observadores diferentes, uno moviéndose con respecto al otro, obtienen resultados distintos. La masa, por tanto, no es invariante. Aunque las derivaciones no se dan aquí, la teoría especial da la ecuación de transformación $m = \gamma m_0$, o sea,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (25c)$$

donde m_0 es la masa de un objeto en reposo con respecto a un observador O , y m es su masa cuando se está moviendo pasando frente a él a una velocidad v . En la fig. 25F se presenta un diagrama

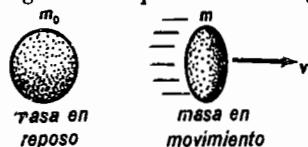


Fig. 25F. Diagrama esquemático ilustrando el aumento relativista de masa y la contracción de Lorentz-Fitzgerald debida al movimiento.

de una situación práctica en que la *masa en reposo* m_0 no se está moviendo con respecto al observador O , mientras que a la derecha la misma masa se presenta moviéndose con una velocidad v .

La Tabla 25A da los valores de la masa relativista de objetos en una amplia gama de velocidades.

Al 1% de la velocidad de la luz (3 000 km/seg) la masa de un cuerpo es sólo un medio de uno por ciento mayor que su *masa en reposo*. Al 50% de la velocidad de la luz, la masa m ha aumentado 15% mientras que al 99.9% de la velocidad de la luz ha saltado a ser 22 veces su masa en reposo. Estos valores están en magnífica concordancia con los experimentos hechos con partículas a alta velocidad; un tema que se considerará en detalle en posteriores capítulos.

Es importante notar que, conforme aumenta la velocidad de cualquier masa

dada, la masa crece lentamente al principio y luego con mucha mayor rapidez al acercarse a la velocidad de la luz. De cualquier modo, no habrá ninguna masa que se pueda mover con la velocidad de la luz, pues por la ec. (25c) su masa se haría infinita.

25.6 Relación masa-energía, de Einstein. Así como el sonido, el calor y la luz son formas de energía, la teoría especial de la relatividad de Einstein muestra que la masa es una forma de energía. La expresión que da la relación entre la masa y la energía es una ecuación familiar a todos. Es esta,

$$E = mc^2 \quad (25d)$$

donde m es la masa, c la velocidad de la luz y E es la energía equivalente a la masa. La validez de esta ecuación está ahora bien establecida por cientos de experimentos en que intervienen núcleos atómicos y también en el tema general llamado energía atómica.

Si un objeto tiene una *masa en reposo*, m_0 , tiene almacenada dentro de él una energía total m_0c^2 . Si la misma masa se está moviendo con una velocidad v , su masa ha aumentado a m y la energía total almacenada es mc^2 .

Cuando se aplica una fuerza F para acelerar una masa dada, la cantidad de trabajo realizado es dada en la mecánica clásica por la segunda ley del movimiento de Newton.

$$T = F \times d$$

Como resultado de este trabajo hecho, el objeto cuya *masa en reposo* es m_0 , se

mueve con una velocidad v y tiene una energía cinética E_k

$$F \times d = E_k$$

Aplicando la ley de la conservación de la energía, sumamos la energía cinética a la energía m_0c^2 que tenía cuando estaba

en reposo y obtenemos la energía total mc^2 .

$$m_0c^2 + E_k = mc^2 \quad (25e)$$

Si despejamos E_k , obtenemos la energía cinética de una masa en movimiento como la relación

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 \quad (25f)$$

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

(Considerar la velocidad de la luz como 3×10^8 m/seg, ó 186 000 mi/seg, en todos los problemas siguientes.)

1. ¿Cuál es el objeto del experimento Michelson-Morley?

2. Describir el instrumento usado en el experimento Michelson-Morley. Hacer un diagrama. ¿Cuáles fueron los resultados de ese experimento?

3. ¿Qué se entiende por la contracción Lorentz-Fitzgerald? Escribir la ecuación y explicar su significado con un diagrama.

4. ¿Puede algún objeto material moverse con la velocidad de la luz? Explicar la respuesta.

5. ¿Varía la masa de un objeto con su velocidad? Si un objeto está en reposo y el observador en movimiento, ¿parecerá tener el objeto su *masa en reposo*? Explicarlo.

6. Escribir la ecuación de masa y energía y explicar el significado de cada término.

7. Encontrar la longitud de una regla métrica moviéndose a lo largo con una rapidez de 2.7×10^8 m/seg. Considerar que ocurre una contracción Lorentz-Fitzgerald. (Resp. 43.6 cm.)

8. Si una nave espacial de 50 m de largo pasa frente a la Tierra a 2.4×10^8 m/seg, ¿cuál será su longitud aparente, suponiendo una contracción Lorentz-Fitzgerald?

9. Un vehículo espacial de 100 ft de largo pasa con una velocidad de 180 000 mi/seg. Encontrar su longitud aparente medida por un observador desde tierra. (Resp. 25.1 pies.)

10. Un observador en la Tierra ve una nave espacial viajando a 2.4×10^8 m/seg, adelantándose a otra nave espacial que viaja a 1.8×10^8 m/seg. ¿Cuál es la velocidad relativista de: a) la segunda nave vista desde la primera; b) la primera nave vista desde la segunda, y c) su velocidad relativa según se ve desde la Tierra?

11. Un observador desde la Tierra ve una nave espacial alejándose de ella a 2.0×10^8 m/seg, que lanza un proyectil por delante del planeta. Según se ve desde la tierra el proyectil tiene una velocidad de 2.25×10^8 m/seg. ¿Cuál es la velocidad del proyectil respecto a la nave según se observa desde: a) la nave espacial, y b) la Tierra? (Resp. a) 0.5×10^8 m/seg; b) 0.25×10^8 m/seg.)

12. Un observador terrestre ve una nave espacial acercándose a la Tierra con un tercio de la velocidad de la luz. La nave lanza un vehículo explorador que desde la Tierra parece acercarse a dos quintos de la velocidad de la luz. ¿Cuál es la velocidad del vehículo con respecto a la nave espacial observada desde: a) la nave espacial, y b) la Tierra?

13. Dos naves del espacio se acercan entre sí, cada una con dos tercios de la velocidad de la luz. ¿Con qué velocidad se acerca cada nave espacial a la otra, observando desde cualquiera de las naves? (Resp. 2.77×10^8 m/seg, ó 0.92 c .)

14. Unas partículas atómicas en forma de haz tienen una velocidad del 60% de la velocidad de la luz. ¿Cuál es su masa relativista comparada con su *masa en reposo*?

TABLA 25A. MASA RELATIVISTA A DIFERENTES VELOCIDADES

Relación de velocidades v/c en por ciento	1%	10%	50%	90%	99%	99.9%
Masa relativa m/m_0	1.000	1.005	1.15	2.3	7.1	22.3

15. Unas partículas atómicas en forma de haz tienen el 95% de la velocidad de la luz. ¿Cuál es la masa relativista comparada con su masa en reposo, m/m_0 ? (Resp. $m/m_0 = 3.20$.)

16. Una partícula atómica tiene una masa en reposo de 1.7×10^{-25} kg. Encontrar su masa energía total cuando está: a) en reposo, y b) cuando tiene cuatro quintos de la velocidad de la luz.

17. Dos partículas atómicas, cada una con una masa en reposo de 2.0×10^{-25} kg, se acercan una a otra en un choque de frente. Si cada una tiene una velocidad inicial de 2.0×10^8 m/seg, ¿cuál es: a) la velocidad de un átomo según se ve desde el

otro, y b) la masa relativista de uno visto desde el otro? (Resp. a) 2.77×10^8 m/seg; b) 5.2×10^{-25} kg.)

18. Si se convierte una masa atómica de 1.5×10^{-25} kg en energía y toda ella se imparte como energía cinética a otra partícula atómica con una masa en reposo de 1.0×10^{-25} kg, ¿cuál será la velocidad del átomo?

19. ¿A qué velocidad debe moverse un cuerpo para tener una masa doble de su masa en reposo? (Resp. 86.6% de c , ó 2.60×10^8 m/seg.)

20. ¿Con qué velocidad debe moverse una masa para que sea diez veces su masa en reposo?

ELECTRICIDAD EN REPOSO

26.1 Electrización por frotamiento. Es imposible decir cuándo se descubrió la electricidad. Se han encontrado referencias de que hacia el año 600 a.C. se conocieron las propiedades de atracción del ámbar. Se acredita a Tales de Mileto (640-645 a.C.), uno de los siete sabios de Grecia, el haber observado que el ámbar, previamente frotado, atrae pequeños materiales fibrosos y pedacitos de paja. Se usaba el ámbar en ese tiempo, al igual que ahora, en adornos. Así como los metales preciosos tenían sus nombres de oro y plata, de igual manera el ámbar tenía su nombre de *eléctron*.

Aunque la electrización del ámbar por el frotamiento pasó de un escritor a otro, no se descubrió nada nuevo sobre este fenómeno durante más de 2 000 años. No fue sino "hasta principios del siglo XVII cuando sir William Gilbert* anunció el descubrimiento de que muchas sustancias podían electrizarse por frotamiento. A este efecto, Gilbert le llamó *eléctrico*, derivado

* Sir William Gilbert (1540-1603), médico de la corte de la reina Isabel, filósofo notable y físico experimental. Publicó en 1600 un libro sobre magnetismo *De Magnete*. Este libro estaba lleno de hechos y experimentos valiosos sobre electricidad y magnetismo; y, entre otras cosas, contenía muchas críticas sobre sus contemporáneos, sus predecesores y los filósofos antiguos. En su prefacio escribió: "Por qué he de someter yo esta nueva filosofía al juicio de los hombres que han jurado seguir las opiniones de otros, a los más insensibles corruptores de las artes, los payasos letrados, gramáticos, sofistas, peroradores y plebe equivocada? A ustedes solamente, verdaderos filósofos, mentes ingeniosas, que no sólo buscan el conocimiento en los libros sino en las cosas mismas, he dedicado estos fundamentos de la ciencia magnética." Defiende y emplea él mismo tan intensamente el método experimental que se le clasifica como un científico que, junto con su contemporáneo Galileo, fue padre de la física moderna.

de la palabra *eléctron*. Ahora es un hecho bien establecido que todos los cuerpos se electrizan al frotarse entre sí, y que el ámbar es sólo una de las muchas sustancias que muestran intensamente este efecto.

26.2 Atracción electrostática. La palabra *electrostática* significa electricidad en reposo, y la palabra atracción se refiere a la fuerza ejercida por un cuerpo sobre otro, estando separados alguna distancia. Para demostrar la atracción electrostática, se usa frecuentemente una varilla de caucho o de ámbar frotada con una franela o una piel. Esto electriza la varilla, de manera que cuando se acerca por encima de pequeños trocitos de papel, saltan éstos hacia la varilla y se adhieren a ella.

En la fig. 26A se ilustra la atracción que ejerce sobre la madera una varilla electri-

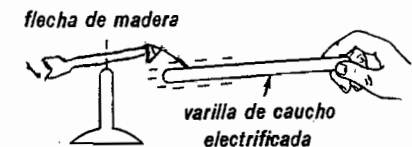


Fig. 26A. Una varilla electrizada por frotamiento atrae a una flecha de madera.

zada de caucho. Una pequeña flecha recortada de una tabla de madera seca, se monta de manera que tenga libertad de girar en torno a un eje, como se ve en la figura. Cuando se acerca la varilla electrizada a la punta de la flecha, ésta es atraída girando hasta señalar hacia aquélla. Si se acerca al extremo opuesto, vuelve a ser atraída la madera, señalando entonces la flecha una dirección opuesta a la anterior.

Un peine ordinario de caucho duro que se pase entre los cabellos, se carga con electricidad y atrae en la misma forma objetos ligeros. En algunas ocasiones es tan grande la carga eléctrica producida en el peine, que pueden verse saltar pequeñas chispas entre el peine y el cabello. Esto se puede notar más fácilmente en un cuarto oscuro. Estas chispas son la causa del ruido que frecuentemente se oye al peinarse.

Se puede producir un efecto muy espectacular llevando la varilla de caucho car-

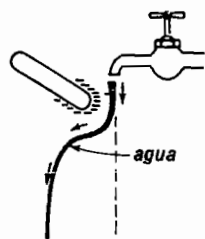


Fig. 26B. Una corriente de agua se desvía fácilmente con una varilla cargada.

gada, cerca de un chorro de agua que cae de la llave. Como se ve en la fig. 26B, el chorro se desvía hacia un lado y aun se mueve horizontalmente antes de que vuelva a caer.

Si se coloca una hoja de papel en la tabla de una puerta o en otra superficie plana y se frota contra ella, se quedará adherida y seguirá ahí por algún tiempo antes de caer.

26.3 Electricidad $+$ y $-$. Cuando se frotan entre sí dos substancias diferentes y luego se separan, se encuentra que las dos se han electrizado, una con electricidad de una clase, y la otra con electricidad distinta. Para ilustrar esto, se carga un extremo de una varilla de caucho, frotándola con una piel y luego se suspende de un pequeño soporte como se ve en la fig. 26C. Cuando se acerca el extremo electrizado de otra varilla semejante, cargada, como se ve en el diagrama (a), la varilla suspendida gira, alejándose, indicando repulsión. Si se acerca la piel en vez de la segunda varilla, entonces la varilla suspendida es atraída y gira hacia la piel. Cuando se acerca una varilla de vidrio, previamente frotada con seda, como se ve en el diagrama (b), hay atracción y cuando se acerca la seda hay repulsión.

Ya que la piel, al igual que el vidrio, atraen a la barra electrizada, de caucho, los dos tendrán la misma clase de electricidad: se dice que tienen *carga positiva*. Se dice que el caucho y la seda, según su

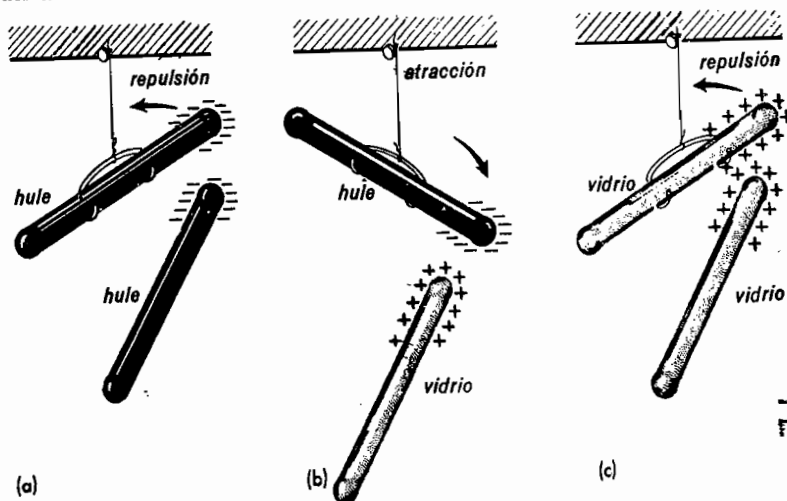


Fig. 26C. Las cargas eléctricas de signos iguales se repelen y las contrarias se atraen.

manera de actuar, tienen *carga negativa*. Las cargas positivas se indican con el signo $(+)$ y las negativas con el signo $(-)$.

Los experimentos anteriores, además de indicar la existencia de dos clases de electrización, también demuestran una regla de la acción de estas dos electricidades. El diagrama (a), que ilustra una barra de caucho con carga negativa rechazando a otra barra semejante, hace ver que las cargas negativas se repelen entre sí. El diagrama (b) hace ver que las cargas positivas frente a las negativas se atraen mutuamente, y el diagrama (c) hace ver que las dos cargas positivas se repelen entre sí. Puede establecerse la ley general así: *las cargas iguales se repelen, y las contrarias se atraen*.

26.4 Teoría de la electrización. Históricamente ha habido dos teorías importantes sobre la electrización: la teoría de un fluido, de Benjamín Franklin,* y la teoría de los dos fluidos, de Charles Du Fay. Conforme a la teoría de los dos fluidos, todos los objetos contienen cantidades iguales de los mismos. Cuando se frotan entre sí dos substancias diferentes, una clase de fluido (positivo) se acumula en un objeto, y la otra clase de fluido (negativo), en el otro.

Conforme a la teoría de Franklin, todos los cuerpos contienen una cierta cantidad fija de un fluido o *fuego eléctrico* que las mantiene en un estado no cargado o neutro. Cuando se frotan entre sí dos objetos, uno de ellos acumula un exceso de fluido y resulta cargado positivamente, mientras

que el otro pierde algo de fluido y queda con carga negativa. A Franklin es a quien debemos los términos *más* y *menos*, y *electricidad positiva* y *negativa*.

Las dos teorías son en parte correctas, según lo que ahora sabemos del mecanismo de como se electrizan los cuerpos por frotamiento. La teoría moderna se basa en el principio, ya anteriormente expuesto, de que todas las substancias están formadas por átomos y moléculas. Cada átomo contiene un núcleo con una cantidad conocida de carga positiva (ver la fig. 26D). Esta carga positiva se debe a la

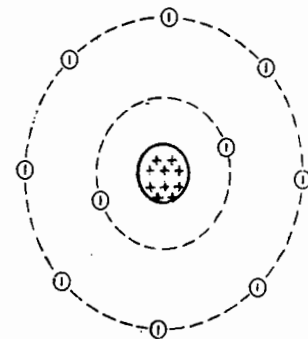


Fig. 26D. Diagrama de un átomo de neón. Su núcleo en el centro con diez partículas con carga positiva (protones) rodeados por diez partículas con carga negativa (electrones).

presencia en el núcleo de cierto número de *protones*. Todos los protones son iguales y tienen la misma masa y la misma carga positiva. Alrededor de cada núcleo atómico hay un número de partículas cargadas negativamente, llamadas *electrones*.

Cada átomo de una substancia es eléctricamente neutro en su estado normal; en otras palabras, tiene cantidades iguales de cargas positivas y negativas. Ya que cada electrón tiene la misma cantidad de carga que los demás electrones y la misma cantidad que cada protón, pero con signo opuesto, habrá tantos protones en el núcleo como electrones haya rodeándolo. Aunque los protones son mucho más pequeños en tamaño que los electrones, contienen la mayor parte de la masa de cada

* Benjamín Franklin (1706-1790). Empezando como aprendiz de impresor cuando joven, llegó a ser un hombre de habilidades extraordinarias; no sólo en la política y la diplomacia, sino también en la investigación científica. La naturaleza eléctrica del rayo fue su más famoso descubrimiento científico. Lo realizó haciendo volar una cometa entre las nubes en un día tormentoso, y observando las chispas eléctricas que saltaban del extremo de la cuerda de la misma (un alambre de cobre) cercano a la tierra. Entre sus muchas aplicaciones prácticas de los descubrimientos científicos, inventó el pararrayos, y construyó el primer par de anteojos bifocales.

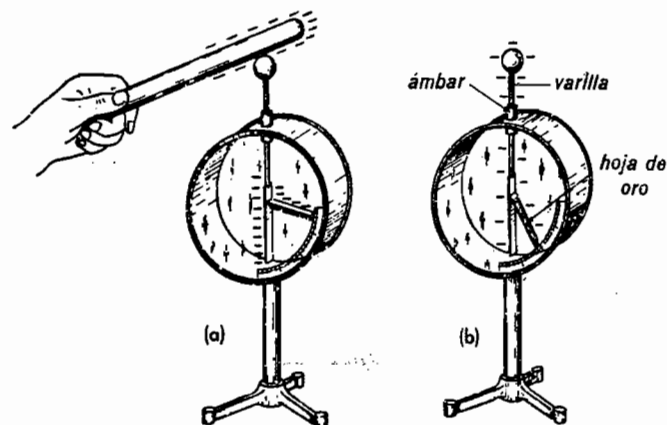


Fig. 26E. Electroscopio, al que se le está cargando negativamente.

átomo. Por ejemplo, un protón pesa cerca de dos mil veces más que un electrón. Por tanto, los electrones son partículas u objetos ligeros que se mueven alrededor de un núcleo pequeño, pero relativamente pesado.

Los átomos individuales o los grandes grupos de átomos y moléculas, tienen una *afinidad*, una *atracción* para adquirir electrones adicionales sobre el número exacto que neutraliza las cargas positivas del núcleo. Esta atracción de los átomos por un número mayor al suficiente de los electrones, varía considerablemente de un átomo a otro y de una sustancia a otra. Por ello, cuando se ponen en contacto dos sustancias diferentes, la sustancia que tiene mayor afinidad con los electrones, captura los más cercanos del otro, y adquiere así una carga negativa. Este es el caso, por ejemplo, del caucho y el ámbar al ser frotados con la piel. Por tener una fuerte afinidad con los electrones, estos dos sólidos se cargan muy intensamente con signo negativo, mientras que la piel resulta con un defecto de electrones y, por tanto, queda cargada positivamente.

26.5 El electroscopio. El electroscopio es un instrumento que sirve para medir el potencial eléctrico de un cuerpo cargado. Se fija una cinta delgada de hoja de oro

(pan de oro), a un lado de una varilla larga y angosta de metal, y se instala dentro de una caja de metal y vidrio (ver la fig. 26E). El soporte de la hoja de oro, que puede llamarse vástago, está aislado, mediante ámbar, de la caja. Cuando se toca el botón *N* con una varilla de caucho cargada, fluyen algunas de las cargas a la varilla y se distribuyen en ésta y en la hoja de oro. Como las cargas iguales se repelen entre sí, la hoja de oro se levanta alejándose del soporte, como se ve en el diagrama. Cuando se aleja la fuente de carga, el electroscopio conserva su carga adquirida, que se distribuye más o menos

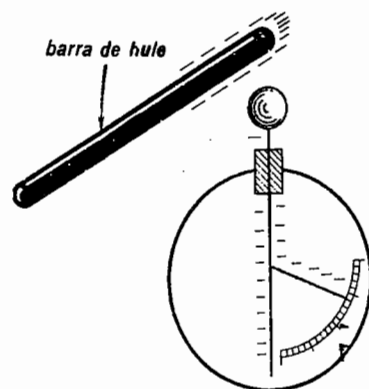


Fig. 26F. Un cuerpo con carga negativa hace que se aleje más la hoja de oro que tiene también carga negativa.

uniformemente en la varilla, y hace que la hoja se mantenga separada a cierto ángulo menor, según se ve en el diagrama (b). Cuanto más se cargue al electroscopio, más allá será rechazada la hoja de oro.

Si un electroscopio se carga primero negativamente, como se ve en la fig. 26E, y luego se acerca un objeto cargado negativamente, pero sin tocar al botón, como se ve en la fig. 26F, la hoja de oro se elevará. La razón de esto es que los electrones son rechazados del botón hacia el extremo inferior de la varilla, haciendo que la hoja de oro suba más alto. Si los dos cuerpos no se han tocado entre sí, permitiendo que entren más cargas negativas al electroscopio, la hoja de oro volverá a caer a su posición original cuando se aleje la barra cargada negativamente.

Si se acerca una barra con carga positiva, como se ve en la fig. 26G, las cargas

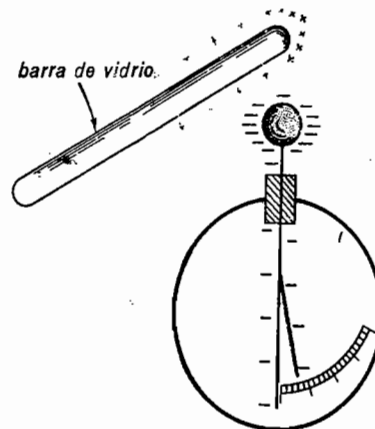


Fig. 26G. Un cuerpo con carga negativa hace que baje la hoja de oro de un electroscopio con carga positiva.

negativas de la varilla y de la hoja de oro son atraídas hacia el botón, haciendo que baje la hoja de oro. En conclusión, si se tiene un electroscopio con carga negativa, el acercamiento de una carga positiva hace que la hoja de oro caiga y el acercamiento de un cuerpo con carga negativa la hace

subir. Si el electroscopio está cargado positivamente, ocurre la acción inversa: una carga positiva hace que la hoja se eleve y una carga negativa la hace descender.

26.6 Conductores y aisladores. No todas las sustancias son buenas conductoras de la electricidad. Como regla general, los metales son buenos conductores, y los no metales son malos conductores. Los peores conductores son llamados generalmente *aisladores* o *no conductores*. En la tabla 26A se dan ejemplos de conductores y no conductores.

TABLA 26A. EJEMPLOS DE BUENOS CONDUCTORES DE LA ELECTRICIDAD Y DE MALOS CONDUCTORES O AISLADORES

Conductores	No conductores
Níquel	Vidrio
Platino	Ámbar
Hierro	Hule
Mercurio	Mica
Plata	Azufre
Aluminio	Porcelana
Cobre	Papel
Oro	Seda

La conducción de la electricidad se ilustra con el experimento que se presenta en la fig. 26H. Se conecta un extremo de un alambre delgado de cobre a un electroscopio y el otro extremo a una pequeña esfera de bronce montada sobre un pedestal de vidrio. Cuando se toca la esfera con una barra de hule cargada, como se indica en la figura, se eleva inmediatamente la hoja de oro del electroscopio. Los electrones se han trasladado a lo largo del alambre. Si se toca la esfera con una barra cargada positivamente, los electrones salen del electroscopio y dejan a la hoja de oro con una carga positiva.

Si el alambre de cobre del experimento anterior es reemplazado por un mal conductor, como un hilo de seda, el electroscopio no se podrá cargar por el contacto de la varilla con la esfera distante. Los

malos conductores, tales como el vidrio y el ámbar son usados para sostener las partes metálicas de los aparatos eléctricos con el propósito de aislarlos y evitar las pérdidas innecesarias de electricidad. Por ejemplo, un electroscopio conservará bien su carga eléctrica si se usa ámbar para que la hoja de oro y la varilla queden aisladas de la caja del electroscopio, como se ve en la fig. 26E.

La diferencia entre un conductor y un aislador o dieléctrico, es que en el conductor hay electrones libres, mientras que

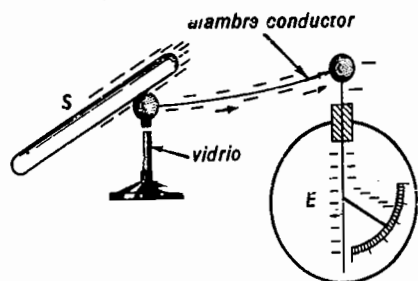


Fig. 26H. La corriente eléctrica es un flujo de electrones.

en el aislador todos los electrones están fuertemente ligados a sus respectivos átomos. En un cuerpo neutro hay un número igual de cargas positivas y negativas. En los metales hay algunos electrones libres moviéndose de un átomo a otro; de manera que cuando se acerca una varilla con carga negativa al extremo de un conductor, la varilla rechaza los electrones cercanos del conductor haciéndolos alejarse. Estos a su vez rechazan a los electrones libres que están delante de ellos, dando lugar a un flujo de electrones a todo lo largo del conductor. Por esto, en la fig. 26H, los electrones que llegan a la hoja del electroscopio no son necesariamente los electrones de la varilla cargada negativamente, sino más bien son los electrones del extremo del alambre que toca el botón del electroscopio.

Hay un gran número de sustancias que no son ni buenas conductoras de electricidad ni buenos aisladores. Dichas sustancias son los *semiconductores*. En ellas

los electrones sólo pueden ser movidos con alguna dificultad, es decir, por una fuerza considerable.

26.7 La ley de las fuerzas electrostáticas. Ya se ha demostrado que las cargas iguales se repelen y las cargas contrarias se atraen; pero no se ha dicho hasta ahora cuál es la intensidad de la repulsión o de la atracción, ni cómo dependen, en su valor, de las cargas y de la distancia que hay entre ellas.

La primera medida cuantitativa de las fuerzas que hay entre dos cuerpos cargados, fue hecha por Coulomb, científico e ingeniero francés, en 1780. Probó experimentalmente que la fuerza que actúa entre dos cargas es directamente proporcional al producto de las mismas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Esta ley se escribe simbólicamente como ecuación algebraica,

$$F = k \frac{QQ'}{d^2} \quad (26a)$$

donde F es la fuerza, Q y Q' las cargas y d la distancia que la separa (ver la figura 26I). La constante de proporción, k , tiene un valor que depende de las unidades que se escojan para medir la carga.

En el sistema MKS, la fuerza se mide en *newtons*, la distancia en *metros*, la car-

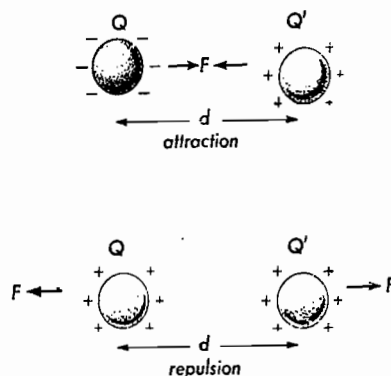


Fig. 26I. Dos cargas de signos iguales se rechazan y dos cargas contrarias se atraen.

ga en *culombios*, y $k = 9 \times 10^9$. Se acostumbra definir el culombio en función de las corrientes eléctricas. *Un culombio es la cantidad de carga eléctrica que, fluyendo por cualquier punto de un alambre en un segundo, produce una corriente de un amperio.*

En capítulos posteriores se describen experimentos que demuestran que los electrones son todos iguales y que cada uno lleva una cantidad de carga de:

$$e = 1.6019 \times 10^{-19} \text{ culombio} \quad (26b)$$

Esto significa que, cuando un cuerpo tiene una carga negativa de un culombio, tiene un exceso de $1/1.6019 \times 10^{-19}$ o bien, de 6.24×10^{18} electrones, y que un cuerpo con carga positiva de un culombio tiene un faltante de 6.24×10^{18} electrones.*

$$1 \text{ culombio} = 6.24 \times 10^{18} \text{ electrones} \quad (26c)$$

Ya que la unidad de carga en el sistema MKS es medida en función de la corriente eléctrica, el valor numérico de k en la ecuación (26a) debe determinarse experimentalmente. El mejor valor obtenido hasta ahora es $k = 8.9878 \times 10^9$. Para la mayoría de los problemas prácticos se usará la aproximación $k = 9 \times 10^9$.

$$k = 9 \times 10^9 \frac{\text{newton-metro}^2}{\text{culombio}^2} \quad (26d)$$

Ejemplo 1. Una carga de $+25 \times 10^{-9}$ culombios, se coloca a 6 cm de otra carga de -72×10^{-9} culombios. Calcular la fuerza entre ellas.

Solución. Los datos son $Q = 25 \times 10^{-9}$ culombios y $Q' = -72 \times 10^{-9}$ culombios, $d = 0.06$ m. Sustituyendo en la ec. (26a), obtenemos

$$F = 9 \times 10^9 \frac{\text{newtons-m}^2}{\text{culombio}^2} \frac{(25 \times 10^{-9})(-72 \times 10^{-9}) \text{ culombio}^2}{(0.06)^2 \text{ m}^2}$$

$$F = -4.50 \times 10^{-3} \text{ newton}$$

El signo negativo indica atracción. Debe notarse que el *culombio* es una medida de carga extremadamente grande.

26.8 El campo electrostático. En el espacio que rodea a un cuerpo cargado hay un *algo* invisible, llamado *campo electrostático*. Este campo es sólo otra forma de describir la acción que tiene una carga sobre otra, estando separadas cierta distancia. *La intensidad del campo electrostático en cualquier punto cercano a un cuerpo cargado, es igual a la fuerza ejercida sobre una unidad de carga positiva colocada en ese punto.*

Ya que la fuerza es una cantidad vectorial, el campo electrostático tiene magnitud y dirección. El campo que rodea a una carga positiva será radial hacia fuera, como se ve en la fig. 26J(a). Es radial hacia fuera, ya que una carga positiva colocada en cualquier punto es rechazada a lo largo de una línea que pasa por las dos cargas. Por un razonamiento semejante se ve que el campo que rodea a una carga negativa es radial hacia dentro, como se ve en el diagrama (b).

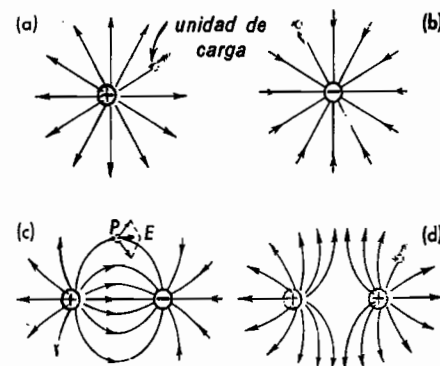


Fig. 26J. Campos electrostáticos cerca de cuerpos cargados.

* Para una explicación del uso del 10 con exponentes al expresar números, ver el Apéndice VII.

En los diagramas (c) y (d), se ilustra el campo electrostático que rodea a dos cuerpos cargados. Cada uno de estos campos puede ser trazado experimentalmente colocando una carga positiva en cualquier punto y moviéndola siempre en la dirección de la fuerza F que se está ejerciendo sobre ella. Las líneas trazadas por esta carga, son llamadas líneas electrostáticas de fuerza. Ha de notarse que se pueden dibujar tantas líneas como se desee, y que nunca se cruzan dos de ellas. Más aún, las líneas mismas son imaginarias y no existen realmente. Fueron introducidas por primera vez por Michael Faraday, hacia 1820, como una ayuda para comprender los fenómenos eléctricos.

La dirección de las líneas de fuerza es dada por las puntas de flecha; y la magnitud relativa del campo, en cualquier región, está representada por el número relativo de líneas que pasan por la misma. De acuerdo con la ley de Coulomb, la intensidad del campo en cualquier punto cercano a un cuerpo cargado es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a que se encuentra de dicho cuerpo.

26.9 Campo electrostático uniforme. Observando el comportamiento de las partículas atómicas cargadas que atraviesan un campo electrostático uniforme, se puede obtener muchos conocimientos en los estudios experimentales de la estructura atómica. Para obtener este campo, es decir, un campo con magnitud y dirección constante en un volumen definido del espacio, se colocan dos placas planas paralelas entre sí, como se ilustra en la fig. 26K.

Cuando se conectan estas placas a las terminales de una batería con una fuerza electromotriz V , como se ve en el diagrama

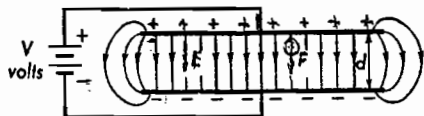


Fig. 26K. El campo electrostático entre dos placas paralelas es uniforme.

ma, se produce entre las placas un campo eléctrico uniforme E . Fuera de estas placas, y cerca de los extremos, el campo no es uniforme.

En mecánica se define el *trabajo realizado* como *fuerza por distancia*, $T = F \times d$. El equivalente eléctrico de esta ecuación se obtiene, por lo tanto, por sustitución directa de las cantidades eléctricas equivalentes al trabajo y a la fuerza. Ya que el trabajo hecho por unidad de carga es llamado *diferencia de potencial*, V , y la fuerza por unidad de carga se llama *intensidad de campo electrostático*, E , ver la ecuación (6b), la ecuación del trabajo $T = F \times d$ se convierte en:

$$V = E \times d \quad \text{o} \quad E = \frac{V}{d} \quad (26e)$$

V se da en voltios, d en metros y E en voltios/metro o en su equivalente *newtons/culombios*. En otras palabras,

$$1 \frac{\text{voltio}}{\text{metro}} = 1 \frac{\text{newton}}{\text{culombio}} \quad (26f)$$

Cuando se coloca una carga, Q , en un campo electrostático de intensidad E , sufrirá una fuerza que viene dada por

$$F = Q \times E \quad (26g)$$

Como se puede ver por la fig. 26K, E es una cantidad vectorial, y se la escoge, arbitrariamente, con la misma dirección que la fuerza que actúa sobre una carga positiva. La fuerza que sufre una carga negativa será de dirección opuesta a E .

Ejemplo 2. Se montan dos placas metálicas planas paralelas entre sí, a 2.5 cm de distancia. Si se conectan las terminales de una fuente de 10 000 voltios a las placas, y se coloca entre ellas un pequeño objeto con una carga positiva de 2.8×10^{-7} culombios, encontrar: a) la intensidad del campo entre las placas, y b) la fuerza que sufre el cuerpo cargado.

Solución. a) La intensidad del campo E se obtiene utilizando la ecuación (26e).

$$E = \frac{V}{d} \quad E = \frac{10\,000}{0.025} = 4 \times 10^5 \frac{\text{newtons}}{\text{culombios}}$$

b) La fuerza F que sufre la carga Q , se encuentra con la ec. (26g).

$$F = Q \times E$$

$$F = 2.8 \times 10^{-7} \text{ culombio} \times 4 \times 10^5 \frac{\text{newtons}}{\text{culombio}} = +0.112 \text{ newtons}$$

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuántas clases de cargas eléctricas existen? ¿Cómo se les llama? ¿Qué se entiende por electrostática?

2. ¿Cuál es la regla referente a la repulsión y la atracción? ¿Cómo se puede demostrar esta regla?

3. ¿Qué es un electroscopio? ¿Cómo está construido?

4. ¿Cómo está constituido un átomo? ¿Cuántas cargas negativas tiene un átomo neutro?

5. ¿Cuál es la explicación de la electrificación en nuestros días? ¿Por qué se frota los objetos para electrificarlos? ¿Qué clase de cargas se quedan inmóviles en la electrificación?

6. ¿Qué se entiende por no conductor? ¿Qué clase de cargas se mueven en los sólidos conductores?

7. Cuando una barra cargada positivamente se acerca y toca a la perilla de un electroscopio se levanta la hoja de oro. Cuando se retira la barra, la hoja baja parte de su recorrido solamente. ¿Por qué?

8. Cuando se acerca una barra cargada negativamente a la perilla de un electroscopio con carga negativa, ¿qué ocurre?

9. Cuando se acerca una barra con carga negativa a la perilla de un electroscopio cargado positivamente, ¿qué ocurre?

10. El flujo de un líquido por una tubería ¿puede producir cargas eléctricas? Algún ejemplo donde ocurra esto.

11. Al peinarse el cabello, se escucha a veces un ruido chispeante. ¿Por qué? ¿Cómo puede probarse que el peine se ha cargado eléctricamente?

12. Los asientos de plástico de los automóviles hacen a veces que el conductor sufra un choque eléctrico. ¿Por qué?

13. ¿Por qué algunas sustancias son buenas conductoras y otras no? ¿Contienen electrones todas las sustancias?

14. ¿Qué se entiende por un campo eléctrico? ¿Cómo puede encontrarse la intensidad de un campo eléctrico en un punto del espacio? ¿Cuáles son las unidades de la intensidad de campo eléctrico E ?

15. ¿Qué es un campo eléctrico uniforme? ¿Cómo se produce este campo? ¿Cómo se calcula su magnitud? ¿Cómo se determina la dirección de un campo?

16. Una carga positiva de 5×10^{-8} culombios se coloca a 8 cm de una carga positiva de 10×10^{-8} culombios. Calcular la fuerza en newtons ejercida por cada carga sobre la otra.

17. Una carga de -15×10^{-7} culombios se coloca a 15 cm de otra carga de -15×10^{-7} culombios. Calcular la fuerza en newtons ejercida por una carga sobre la otra. (Resp. 1.41 newtons.)

18. Dos cargas de -9×10^{-7} culombios cada una, están colocadas a 20 cm de separación. Cuánta es la fuerza de repulsión ejercida sobre cada una en newtons?

19. Dos cargas contrarias de 40×10^{-8} culombios cada una, están a 25 cm de distancia. ¿Cuál es la fuerza de atracción en dinas ejercida sobre cada una? (Respuesta. 0.2304 dinas.)

20. Dos cargas iguales, colocadas a 30 cm de distancia, se rechazan mutuamente con una fuerza de 2 newtons. Encontrar la magnitud de cada carga en culombios.

21. Dos pequeñas esferas de metal, a 40 centímetros de separación, y con cargas negativas iguales, se rechazan con una fuerza de 2×10^{-3} newtons. Encontrar la carga total en los dos cuerpos en culombios. (Resp. 3.76×10^{-7} culombios.)

22. En los vértices de un triángulo equilátero se encuentran tres cuerpos iguales, cargados positivamente. Hacer un diagrama de las líneas de campo eléctrico alrededor de estos cuerpos.

23. Dos cargas iguales de 12×10^{-7} culombios cada una, se encuentran a 18 cm de separación. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza ejercida sobre cada uno? (Resp. 0.4 newtons.)

24. Una carga de -7×10^{-7} culombios se coloca a 6 cm de otra de $+9 \times 10^{-7}$ culombios. Calcular la fuerza en newtons ejercida por una carga sobre la otra.

25. Dos pequeñas esferas de metal están a 25 cm de distancia. Como tienen cargas positivas iguales, se rechazan con una fuerza de 0.80 newtons. Encontrar la carga que tiene cada cuerpo en culombios. (Resp. $+2.36 \times 10^{-6}$ culombios.)

26. Dos cuerpos igualmente cargados están a 20 cm de separación, y se rechazan mutuamente con una fuerza de 0.4 newtons. Encontrar la carga de cada cuerpo en culombios.

27. ¿Qué carga, Q , colocada a 15 cm de una carga de 8×10^{-8} culombios, produce una fuerza de 0.40 newtons? (Resp. 1.25×10^{-6} culombios.)

28. Cuatro cargas iguales de $+3 \times 10^{-8}$ culombios cada una, están colocadas en los vértices de un cuadrado de 30 cm por lado. Calcular la fuerza resultante sobre cada carga y señalar su dirección en un diagrama a escala.

29. Dos cargas positivas de 8×10^{-7} culombios cada una, se colocan diagonalmente opuestas en un cuadrado de 15 cm por lado. Dos cargas negativas de 8×10^{-7} culombios cada una, se colocan en los otros vértices. Calcular la fuerza resultante sobre cada carga y señalar su dirección, en un diagrama dibujado a escala. (Resp. 0.234 newtons en las cuatro.)

30. Dos placas metálicas planas se montan paralelas y a 8 cm de distancia. Si se aplican las dos terminales de una batería de 220 voltios a estas placas, ¿cuál es la intensidad del campo eléctrico uniforme entre ellas?

31. Dos placas metálicas planas a 2 cm de distancia, se conectan con una batería de 5 000 voltios. Se coloca entre ellas un protón con su carga positiva de 1.6×10^{-19} culombios. Encontrar: a) la intensidad del campo eléctrico entre las placas, y b) la fuerza ejercida sobre el protón en newtons. (Resp. a) 250 000 newtons/culombios; b) 4×10^{-14} newtons.)

32. Dos placas metálicas planas a 4 cm de separación, se conectan con una fuente de 10 000 voltios. Una carga, Q , pequeña, de 5×10^{-8} culombios, es colocada dentro del campo. Encontrar: a) la intensidad del campo eléctrico, y b) la fuerza que actúa sobre la carga Q .

33. Se aplica una batería de 8 000 voltios a dos placas paralelas a 5 mm de separación. ¿Qué fuerza ejercen sobre un electrón con carga de 1.60×10^{-19} culombios cuando pasa por el campo eléctrico uniforme entre las placas? (Resp. 2.56×10^{-13} newtons.)

34. Una fuente de 5 000 voltios se conecta a dos placas metálicas paralelas a 5 cm de distancia. Encontrar la fuerza ejercida sobre el núcleo de un átomo de helio, colocado en el campo eléctrico uniforme entre las placas. La carga de un núcleo de helio es $+3.2 \times 10^{-19}$ culombios.

35. Se conecta una batería de 10 000 voltios con dos placas metálicas paralelas, a 2.5 cm de separación. Encontrar la fuerza que ejercen sobre una partícula atómica que tiene una carga positiva de 1.6×10^{-19} culombios mientras pasa por el campo uniforme entre las placas. (Resp. 6.40×10^{-14} newtons.)

36. Se conecta una batería de 10 000 voltios con dos placas metálicas paralelas, a 2.5 cm de separación. Encontrar la fuerza que ejercen sobre una partícula atómica que tiene una carga positiva de 1.6×10^{-19} culombios mientras pasa por el campo uniforme entre las placas. (Resp. 6.40×10^{-14} newtons.)

ELECTRICIDAD EN MOVIMIENTO

27.1 Una corriente continua de electrones. Para hacer que fluya continuamente una corriente de electrones por un alambre, debe disponerse de un abastecimiento continuo de electrones en un extremo y un abasto continuo de cargas positivas en el otro. Ver la fig. 27A. Se comporta

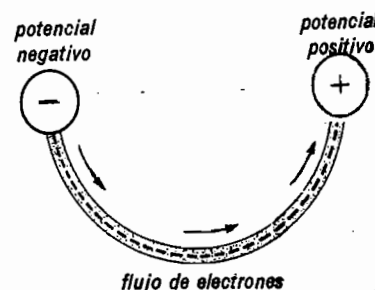


Fig. 27A. Dos terminales a diferentes potenciales y conectados por medio de un conductor, dan origen a una corriente eléctrica.

como el flujo de agua por una tubería: para obtener un flujo continuo de agua, se necesita un abasto continuo en un extremo y una salida por la que descargue a algún recipiente en el otro. El abasto continuo de cargas positivas en un extremo del alambre ofrece el medio de salida a los electrones. Si no se provee esto, los electrones se acumularán en el extremo del alambre, y la repulsión de cargas hacia éste detendrá el flujo de la corriente.

Hay dos métodos generales para obtener un abastecimiento continuo de cargas eléctricas: uno es el uso de una batería y el otro mediante un generador eléctrico. La batería es un aparato, por medio del cual se transforma energía química en eléctrica y el generador sirve para transformar energía mecánica en eléctrica.

La corriente eléctrica se mide generalmente con una unidad llamada *amperio*. El amperio, cuyo nombre honra la memoria del físico francés Ampère,* es el término con que se expresa el flujo de culombios cada segundo. En otras palabras, un culombio, fluyendo por un punto dado de un alambre cada segundo, constituye una corriente de un amperio (amp).

$$1 \text{ amperio} = \frac{1 \text{ culombio}}{1 \text{ segundo}} \quad (27a)$$

Si pasa el doble de esta cantidad de cargas en un segundo, la corriente es de 2 amp. Entonces la corriente eléctrica es análoga a la rapidez de flujo de agua por una tubería.

$$\text{corriente} = \frac{\text{cantidad de carga}}{\text{tiempo}}$$

$$I = \frac{Q}{t} \quad (27b)$$

Recordando que un culombio = 6.24×10^{18} electrones, una corriente de un amperio significa un flujo de 6.24×10^{18} electrones cada segundo por un punto cualquiera. Ver la Sec. 26.7, ec. (26c).

* André M. Ampère (1775-1836), físico y matemático francés. Empezó su carrera como profesor de física y química en Burg a la temprana edad de 26 años. Después estableció la relación entre la electricidad y el magnetismo y ayudó a desarrollar el tema que llamó electrodinámica. Su único hijo, Jan J. Ampère, también logró fama, como filósofo, orador e historiador.

Este enorme número no significa que los electrones se están moviendo con alta velocidad por el conductor. En realidad el número de cargas en movimiento es tan grande que su velocidad media es sólo una pequeña fracción de un milímetro por segundo. Cuando visualizamos un conductor sólido, como una estructura cristalina, semejante a la que se muestra en la fig. 10F, se piensa en los electrones moviéndose por los espacios intermedios. Este movimiento no es completamente libre, ya que sufre la influencia de las repulsiones y atracciones de las cargas iguales y opuestas.

27.2 Baterías. Las baterías, fuentes continuas de energía eléctrica, son el resultado de una larga serie de experimentos que empezaron con el descubrimiento de Alessandro Volta,* hace más de cien años. Actualmente las baterías son fabricadas en dos formas comunes: 1) pilas secas, como las usadas en linternas de mano, radios portátiles, etc., y 2) pilas húmedas (acumuladores), como se usan en automóviles, aeroplanos, botes, etc.

27.3 La celda voltaica. La celda voltaica, como muestra la fig. 27B, está compuesta de tres partes, un par de placas metálicas distintas, llamadas *electrodos*, una solución ácida diluida llamada *electrólito*, y un recipiente no conductor, llamado *celda*. Se han probado y usado muy diversas combinaciones de materiales en estas celdas; pero ahora los de uso más común son cinc y carbón, como electrodos; ácido sulfúrico diluido, como electrólito, y un recipiente de vidrio o hule duro, como celda.

* Alessandro Volta (1745-1827), científico italiano, fue profesor de física en Pavia por más de veinte años. Viajando frecuentemente por Europa, tuvo amistad con muchas celebridades. En 1801 recibió la medalla Copley, de la Real Sociedad de Londres, y después fue llamado a París, donde Napoleón le confirió una medalla. En 1815 fue nombrado director de la Facultad de Filosofía en la Universidad de Padua por el emperador de Austria. En Como, su ciudad de origen, se encuentra ahora una estatua para perpetuar su memoria.

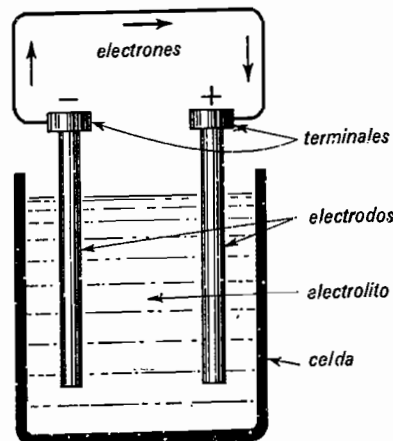


Fig. 27B. Diagrama de una celda voltaica.

Las moléculas individuales de ácido sulfúrico (escrito H_2SO_4) están compuestas de siete átomos cada una: dos átomos de hidrógeno, uno de azufre y cuatro de oxígeno. Cuando se vacía ácido concentrado en agua para formar una solución diluida, un pequeño porcentaje de las moléculas se rompen, es decir, se disocian. Ver la fig. 27C. Los dos átomos de hidrógeno se

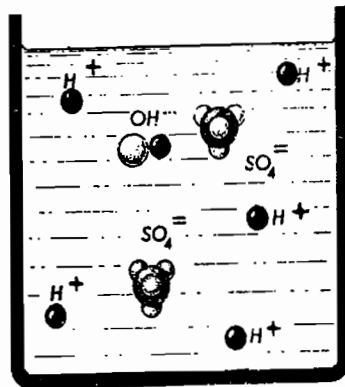


Fig. 27C. Algunas de las moléculas de ácido sulfúrico y de agua se disocian en una solución diluida.

desprenden de las moléculas, dejando cada uno un electrón con el residuo SO_4 . De modo semejante algunas de las moléculas de agua, compuestas de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, se disocian,

desprendiéndose un átomo de hidrógeno sin un electrón.

Como cada átomo de hidrógeno que deja atrás un electrón, tiene una carga neta positiva, y se le llama *ion positivo*. Cada fragmento residual SO_4 del ácido y OH del agua tiene un exceso de cargas negativas y se les llama *iones negativos*.

Si ahora introducimos una barra de cinc en este electrólito, se inicia la acción química, por la cual los átomos individuales de cinc se desprenden de la superficie, dejando dos electrones en la barra. Ver la fig. 27D. Al pasar a la solución como

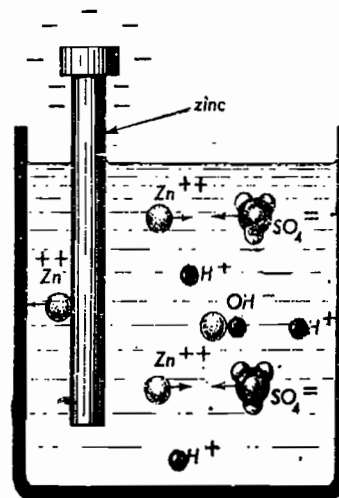
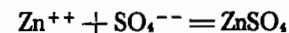


Fig. 27D. Un electrodo de cinc en ácido sulfúrico diluido.

iones positivos con doble carga, atraen fuertemente a los iones SO_4^{--} . Con cada encuentro de estos iones, ocurre la combinación que produce la formación de moléculas neutras de $ZnSO_4$.



Conforme se disuelven más y más iones de cinc, aumenta la carga negativa del electrodo de cinc y pronto llega a un máximo.

Si ahora introducimos dos electrodos, uno de cinc y otro de carbón en el electrólito y completamos el circuito con-

tando los electrodos por medio de un conductor o un voltímetro, como se indica en la fig. 27E, cada electrodo adquiere una carga. El electrodo de carbón, llamado *ánodo*, adquiere un potencial positivo, y el electrodo de cinc, llamado *cátodo*, adquiere un potencial negativo.

Con el voltímetro completando el circuito, como se indica, la aguja señalará la diferencia de potencial en voltios y a ésta

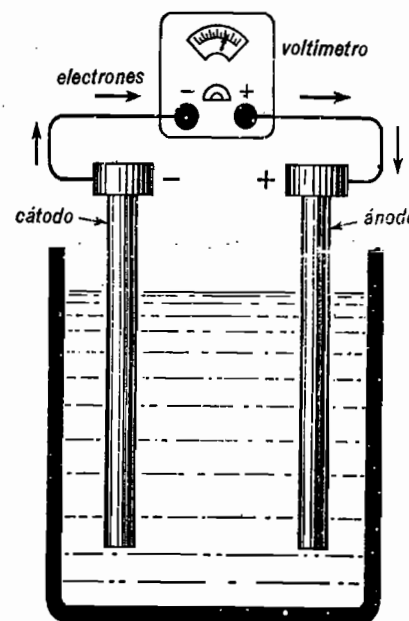


Fig. 27E. La fem de una celda voltaica se mide con un voltímetro.

le llamamos fuerza electromotriz (abreviado fem).

De este modo, fluirán una corriente de electrones del cátodo hacia el ánodo a través de los alambres de conexión y del voltímetro. Los electrones salen de la superficie del cinc metálico, cambian el potencial del cátodo y los electrones que llegan al carbón neutralizan las cargas positivas y con ello cambian el potencial del ánodo. Con la tendencia de la diferencia de potencial a bajar gracias al flujo de electrones, ocurre inmediatamente la reacción química y mantiene un abastecimiento

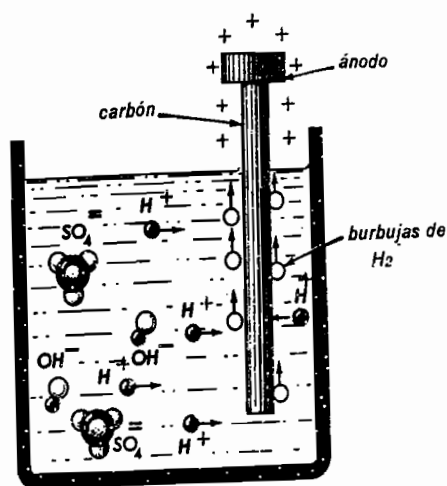
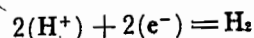


Fig. 27F. Actividad en torno al ánodo de una celda voltaica cuando se cierra el circuito como en la fig. 27E.

continuo de cargas (+) y (-) en las terminales.

En la Fig. 27F se muestra lo que ocurre en el electrodo de carbón en un circuito cerrado. Las cargas negativas fluyen por el voltímetro y por el carbón, donde atraen iones de hidrógeno hacia el ánodo. Allí, sobre la superficie, cada ion H^+ adquiere un electrón y se neutraliza. Dos de estas partículas forman una molécula de hidrógeno neutro H_2 . Conforme se acumulan las moléculas neutras de hidrógeno en la superficie del ánodo, forman burbujas de gas y pueden verse al subir hacia la superficie. La reacción se puede escribir,



Es importante notar que, en un circuito abierto, es decir, sin ninguna conexión de alambre de una terminal a la otra, las terminales tienen una diferencia de potencial constante entre ellos, pero no hay flujo de corriente ni hay actividad química.

27.4 La pila seca. Quizá la forma más común de batería en uso actualmente sea la compuesta de pilas secas. Estas se manufacturan en diferentes formas y tamaños, desde 3 milímetros hasta decenas de cen-

tímetros; pero todas producen la misma fem de 1.5 voltios entre sus dos terminales.

Una forma común de pila seca es la que se presenta en la fig. 27G. El electrodo negativo es un vaso recubierto de cinc, que contiene los ingredientes; y el electrodo positivo es una barra redonda de carbón. En vez del electrolito líquido se usa una pasta que contiene cloruro de amonio, clo-

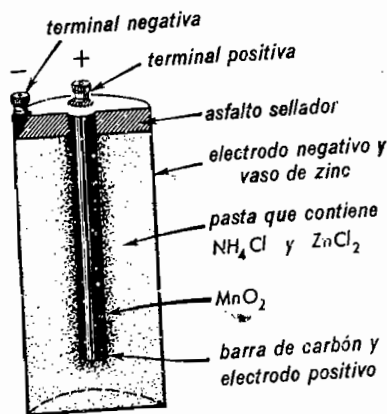


Fig. 27G. Corte transversal de una pila seca o batería de linterna, con sus elementos esenciales.

ruro de cinc y un poco de agua. Rodeando al ánodo, hay una capa delgada de carbón en polvo y dióxido de manganeso.

Cuando la pila seca está produciendo corriente, se forman iones de cinc en el cátodo, mientras que los iones amonio ganan electrones en la barra de carbón, formándose gases hidrógeno y amoníaco. El hidrógeno reacciona químicamente con el dióxido de manganeso y el gas amoníaco con el cloruro de cinc.

Aunque la fem siempre es 1.5 voltios en una pila seca, cuanto más grande es la pila, más intensa es la corriente y la energía que puede proporcionar.

27.5 La pila húmeda. Cuando se agota la energía eléctrica que puede dar una pila seca, ésta se desecha. Por otra parte, un acumulador, está compuesto de lo que se llaman *celdas húmedas*, y cuando se agota

su energía almacenada, puede renovarse o *recargarse*.

El electrodo negativo de un acumulador, como se indica en la fig. 27H, está formada por un grupo de rejillas de plomo paralelas rellenas con *plomo esponjoso* (Pb); el electrodo positivo es otro grupo

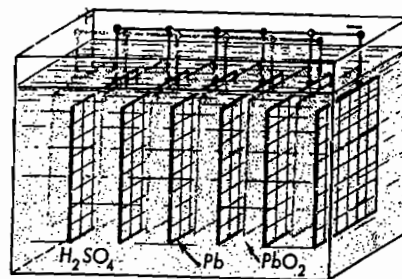
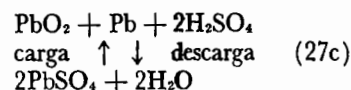


Fig. 27H. La celda o vaso de un acumulador tiene varias placas.

de rejillas rellenas con *dióxido de plomo* (PbO_2) poroso.

Cuando la pila está en circuito cerrado, produciendo corriente, el PbO_2 de un grupo de rejillas y el Pb del otro, se combinan con los iones H^+ y SO_4^{--} disociados del electrolito formando sulfato de plomo ($PbSO_4$) y agua (H_2O). Cuando toda la superficie de las placas queda recubierta con sulfato de plomo, su comportamiento químico es el mismo y ya no se puede obtener más corriente de la celda.

Para recargar un acumulador se conectan las dos terminales a una fuente de corriente continua. Al fluir la corriente por el electrolito se invierten los procesos químicos, retrocediendo todo a su composición original. Químicamente se puede escribir:



Cuando se carga muy rápidamente una celda, algunas de las moléculas disociadas del agua del electrolito se convierten en gas hidrógeno, en el cátodo, y en oxígeno en el ánodo. Estos gases suben a la super-

ficie como burbujas y hacen necesaria la adición ocasional de agua a la celda.

Sin importar su tamaño, cada una de estas celdas produce una fem de 2.2 voltios. Aunque se han desarrollado otros muchos tipos de acumuladores, el acumulador de placas de plomo es el más extensamente usado en América y en muchos países de Europa.

27.6 La batería. Si se conectan juntas dos o más celdas como en la fig. 27I, for-

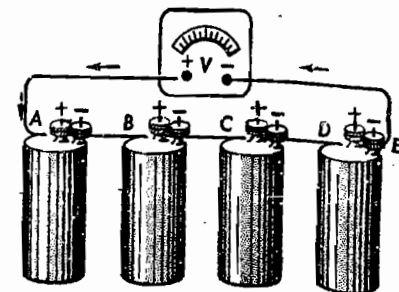


Fig. 27I. Cuatro pilas secas, conectadas en serie, forman una batería de 6 voltios.

man lo que se llama una batería. En este diagrama, la batería está compuesta de cuatro pilas secas conectadas en *serie*. Por conexión en serie se entiende que la terminal (+) de una celda se conecta con la terminal (-) de la siguiente.

El objeto de conectar dos o más celdas en serie es obtener una fem más alta que la producida con una celda sola. La diferencia de potencial entre las terminales extremas, A y E, de cualquier batería es justamente la suma de las correspondientes a las celdas individuales.

Cada pila seca produce una fem de 1.5 voltios, así que, si se conecta el voltímetro al circuito, indicará 1.5 voltios entre A y B, 3.0 voltios entre A y C, 4.5 voltios entre A y D y 6 voltios entre A y E.

Las linternas comunes se alimentan con varias pilas secas conectadas en serie, como se ve en la fig. 27J. Cuando se introducen pilas nuevas, se colocan todas orientadas en la misma dirección, de modo que la



Fig. 27J. Corte transversal de una linterna de 3 celdas.

terminal (+) en el centro de cada pila haga un buen contacto con el fondo (-) de la siguiente pila. El cierre del interruptor mostrado en la figura aplica el voltaje de las terminales de 4.5 voltios a la lámpara.

El acumulador, usado comúnmente en los automóviles, contiene seis celdas de 2 voltios cada una, conectadas en serie, como en la fig. 27K. Nótese cómo se co-

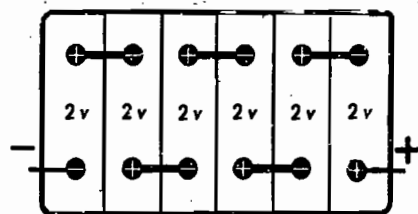


Fig. 27K. Conexión en serie de un acumulador de 12 voltios.

nectaron con las barras gruesas la terminal (-) de una celda con la terminal (+) de la siguiente. Con seis celdas en serie, las terminales producen un potencial resultante de 12 voltios, por ello se las llama *baterías de doce voltios*.

En los diagramas como en la fig. 27L, las terminales (+) y (-) de cada celda son indicadas como líneas largas y cortas respectivamente; los primeros cuatro diagramas representan una, dos, tres y cuatro celdas respectivamente, conectadas en serie. Si se han de representar muchas celdas, se pueden dibujar cuatro o cinco y escribir debajo el voltaje total, como se indica abajo con $V = 45$ voltios.

27.7 Corriente de electrones. Si se conectan dos alambres a las terminales de una

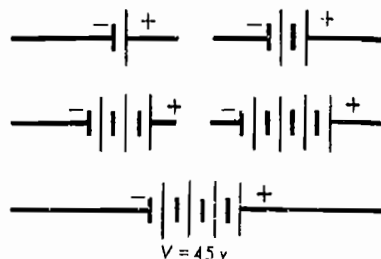


Fig. 27L. Diagramas de circuitos, indicando las celdas de una batería.

batería y los extremos opuestos de los alambres se sumergen en un líquido conductor, como ácido clorhídrico o sulfúrico, los iones positivos del electrolito son atraídos hacia el alambre negativo, donde se neutralizan, y los iones negativos se mueven hacia el alambre positivo, donde también son neutralizados. Los positivos se mueven de (+) a (-), mientras que los negativos se mueven de (-) a (+). Este flujo de cargas en dos sentidos ocurre también en muchos gases.

Hace muchos años, antes de saberse cómo se mueven las cargas o iones en un sólido, como el alambre de cobre, parecía evidente que sólo se movían las cargas positivas y no las negativas. Esta idea se llegó a grabar tan profundamente en las mentes de los que se interesaban en los fenómenos eléctricos que en años posteriores, cuando se descubrió que son los negativos los que se mueven en los conductores sólidos, y no los positivos, resultó difícil aceptar el cambio.

El convenio de que la corriente eléctrica fluye del más al menos se encuentra todavía en muchos libros y es usada por algunos ingenieros electricistas, al diseñar máquinas y aparatos eléctricos. El crecimiento rápido y la importancia de la ingeniería de radio y la electrónica por otra parte, han traído un cambio en esta práctica, y en este texto, al hablar del flujo de corriente en un alambre, lo consideraremos como un flujo de electrones moviéndose de (-) a (+) y le llamaremos *corriente de electrones o electrónica*.

27.8 Ley de Ohm.* Ésta es la conocida y fundamental ley de electricidad, que hace posible determinar la corriente que fluye por un circuito cuando se conocen la resistencia del circuito y la diferencia de potencial aplicada. Lo que descubrió Ohm fue que la relación entre la diferencia de potencial entre los extremos de un circuito y la corriente de electrones que fluyen por él es una constante. La constante de proporcionalidad entre ellos se llama *resistencia eléctrica*.

$$\text{resistencia} = \frac{\text{diferencia de potencial}}{\text{corriente}}$$

Simbólicamente, se escribe con frecuencia la Ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (27d)$$

En unidades eléctricas,

$$1 \text{ ohmio} = \frac{1 \text{ voltio}}{1 \text{ amperio}}$$

Esta ley es de gran importancia, puesto que es de aplicación general a muchos fenómenos eléctricos. Una de sus aplicaciones más simples es ilustrada en la fig. 27M. Una pila seca se conecta directamente mediante alambres a una pequeña lámpara. La batería mantiene una diferencia de potencial de 1.5 voltios entre las terminales de la lámpara. Si la corriente de electrones

* George Simon Ohm (1787-1854), físico alemán, nació en Erlangen y se educó en la Universidad de esa ciudad. Después de enseñar matemáticas en Colonia durante 16 años y en Nuremberg por otros 16 más, pasó a ser profesor de física experimental en Munich. Sus publicaciones fueron numerosas y, con una excepción, no fueron de primer orden. Esta única excepción consiste en el folleto sobre corrientes eléctricas, cuya parte más importante se resume en lo que ahora se llama *Ley de Ohm*. Por este trabajo se le confirió la Medalla Copley, de la Real Sociedad de Londres, en 1841, y se le admitió como miembro extranjero de esta sociedad, un año después.

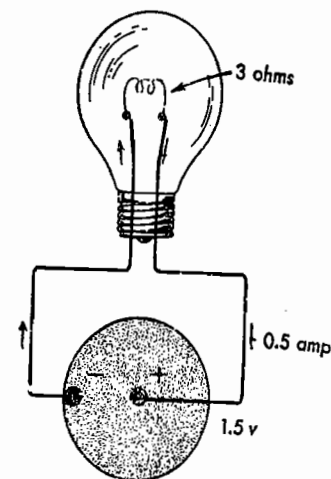


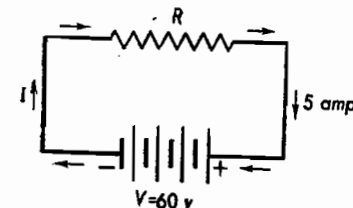
Fig. 27M. Una pila seca conectada a una pequeña lámpara.

que fluye por el circuito es de 0.5 amperios, la resistencia del circuito es de

$$R = \frac{1.5 \text{ voltios}}{0.5 \text{ amperios}} = 3 \text{ ohmios}$$

Aunque la resistencia que encontramos aquí se supone que es de la lámpara, incluye también la resistencia de los alambres de la conexión. En la práctica se usan generalmente alambres con resistencia pequeña que pueda despreciarse en los cálculos. Si no fuese pequeña, no podría despreciarse, y debe añadirse como parte de la R en la Ley de Ohm.

Considérese la ilustración de la fig. 27N, donde, por medio de una batería de muchas celdas, se mantiene una diferencia de potencial de 60 voltios entre las terminales

Fig. 27N. Diagrama del circuito de una resistencia, R , conectada a una batería de 60 voltios.

de un circuito y una corriente de electrones de 5 amperios a través de él. Por la ley de Ohm, se obtiene la resistencia del circuito con la ec. (27d) como

$$R = \frac{V}{I} = \frac{60 \text{ voltios}}{5 \text{ amperios}} = 12 \text{ ohmios}$$

La Ley de Ohm se puede escribir en otras dos formas útiles. Despejando en la ec. (27d) para I , luego para V , obtenemos

$$I = \frac{V}{R}$$

y

$$V = IR$$

En los diagramas de circuitos se representa la *resistencia* por una línea quebrada, como se ilustra, y se representa la palabra *ohmio* con la letra griega mayúscula omega, Ω . En la fig. 27N la resistencia es

$$R = 12 \Omega$$

Se puede definir la resistencia como la oposición presentada al flujo de corriente por un circuito.

Para determinar la resistencia de cualquier circuito eléctrico, se acostumbra usar un voltímetro y un amperímetro. El voltímetro se aplica entre las terminales del circuito para medir la diferencia de potencial y el amperímetro se conecta en serie para medir la corriente.

En la fig. 27O se representa un tablero de conexiones preparado para mediciones

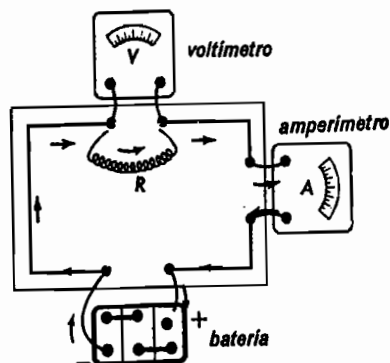


Fig. 27O. Tablero de conexiones para determinar la resistencia eléctrica.

de esta clase. Se conecta un aparato eléctrico o una resistencia, R , desconocida entre las terminales de arriba, para que la corriente de electrones producida por la batería de abajo, pase a través de él y del amperímetro. El voltímetro se conecta en paralelo con R para medir la diferencia de potencial entre sus extremos.

Supóngase que se conectan tres elementos calentadores, comúnmente usado como repuestos para utensilios de cocina, uno después de otro entre las terminales de arriba del tablero y con un acumulador de 6 voltios, en las terminales de abajo. Los siguientes resultados son el voltaje V y la corriente eléctrica I de una corrida de mediciones.

TABLA 27A. DATOS REGISTRADOS

Elemento	Voltios	Amperios
Tostador	6.3	2.3
Parrilla	6.2	1.6
Plancha	6.1	1.8

Por la ley de Ohm, ec. (27d), se puede calcular la resistencia de cada elemento. Esto se deja como ejercicio para el lector.

27.9 Resistencias en serie. Cuando se conectan en serie varios aparatos eléctricos, la resistencia de la combinación R es igual a la suma de las resistencias individuales. Simbólicamente,

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \text{etc.}$$

(27e)

Esta ley de las resistencias en serie se ilustra aplicando la ley de Ohm al circuito eléctrico completo de la fig. 27P. Las tres resistencias, $R_1 = 5$ ohmios, $R_2 = 1$ ohmio y $R_3 = 3$ ohmios se conectan en serie con

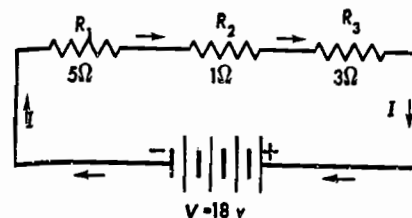


Fig. 27P. Fluye la misma corriente por todas las resistencias conectadas en serie.

una batería de 9 vasos. La suma de las resistencias dada por la ec. (27e) es

$$R = 5 + 1 + 3 = 9 \Omega$$

y la diferencia de potencial suplida por la batería es

$$V = 9 \times 2 = 18 \text{ voltios}$$

Aplicando la ley de Ohm, ec. (27d), la corriente de electrones que fluye por el circuito es

$$I = \frac{18 \text{ voltios}}{9 \Omega} = 2 \text{ amperios}$$

Esto significa que fluye la misma corriente de electrones de 2 amperes por la gran resistencia de 5 ohmios y por las resistencias de 1 y 3 ohmios. Ocurre lo mismo con el agua que fluye por tuberías de diferentes calibres, conectadas una después de otra, que pasa igual cantidad de agua por segundo en una tubería y en otra y no hay acumulaciones en ningún punto. La batería funciona como la bomba y mantiene un flujo continuo de electrones en todo el circuito.

Si las dos terminales de un voltímetro son conectadas en paralelo con la primera resistencia, medirá la diferencia de potencial entre los extremos de R_1 . Conociendo la resistencia de R_1 y la corriente I que pasa por ella, se puede calcular su diferencia de potencial usando la ley de Ohm en la forma $V = IR$.

$$V = I_1 R_1$$

$$V_1 = 2 \text{ amperios} \times 5 \text{ ohmios} = 10 \text{ voltios}$$

un lado de la resistencia al otro, esta diferencia de potencial es comúnmente llamada *caída de IR*. En forma semejante, la caída de IR a través de R_2 y R_3 puede medirse conectando el voltímetro a las terminales de cada uno en tiempos sucesivos, o calcularse como se acaba de explicar.

$$V_2 = 2 \text{ amperios} \times 1 \text{ ohmio} = 2 \text{ voltios}$$

$$V_3 = 2 \text{ amperios} \times 3 \text{ ohmios} = 6 \text{ voltios}$$

Si encontramos la suma de las tres caídas de IR en el circuito, obtenemos

$$10 + 2 + 6 = 18 \text{ voltios}$$

Esto se conoce como la primera ley de Kirchhoff, y se escribe comúnmente en la forma general

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (27f)$$

27.10 Circuitos en paralelo. En la figura 27Q se presenta un diagrama de circuito con tres resistencias R_1 , R_2 y R_3 conectadas

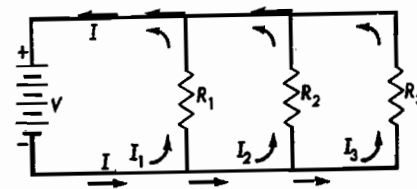


Fig. 27Q. Circuito en paralelo de tres resistencias R_1 , R_2 y R_3 .

en paralelo. La corriente de electrones I que sale de la batería por abajo, a la izquierda, se divide en la primera conexión; la parte, I_1 , pasa por R_1 y el resto sigue hasta la siguiente conexión. La parte I_2 de la corriente de electrones va por R_2 y el resto llega a R_3 y pasa por ella. Estas tres corrientes electrónicas se vuelven a combinar en las conexiones de arriba y forman, finalmente, la misma corriente total, I , que regresa a la batería.

Con esta explicación se ve claramente que, para cualquier número de resistencias en paralelo,

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \quad (27g)$$

donde I es la corriente electrónica total e I_1, I_2, I_3 , etc., son las corrientes de electrones separadas por cada resistencia. La ec. (27g) es la segunda ley de Kirchhoff.

En la fig. 27R se tiene una excelente demostración de la ec. (27g), donde se

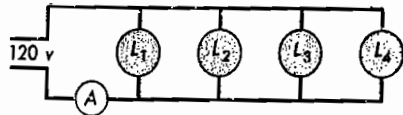


Fig. 27R. Circuito en paralelo de cuatro lámparas de alumbrado.

conectan en paralelo cuatro lámparas de filamento de tungsteno en un circuito doméstico de alumbrado de 120 voltios. Las lámparas pueden ser iguales o diferentes.

Supóngase que las lámparas están marcadas con 25, 50, 75 y 100 vatios, respectivamente, y empezamos con las lámparas suficientemente flojas en sus bases para que estén desconectadas. Cada lámpara se va apretando por turno en su base y tomando la lectura del amperímetro y registrándola y luego se vuelve a aflojar. Supóngase que las corrientes electrónicas registradas son las de la Tabla 27B.

Ahora, apriétese cada lámpara por turno y déjese apretada, y al agregar cada una, regístrese la corriente. Estas corrientes totales pueden resultar como las de la Tabla 27B.

TABLA 27B. DATOS REGISTRADOS

$I_1 = 0.24 \text{ amp.}$	$I_1 = 0.24 \text{ amp.}$
$I_2 = 0.44 \text{ amp.}$	$I_1 + I_2 = 0.68 \text{ amp.}$
$I_3 = 0.65 \text{ amp.}$	$I_1 + I_2 + I_3 = 1.33 \text{ amp.}$
$I_4 = 0.85 \text{ amp.}$	$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 2.18 \text{ amp.}$

Estas sumas de corrientes representan una confirmación experimental de la ley de Kirchhoff, dada en la ec. (27g).

27.11 La ley de las resistencias en paralelo. Otro tipo de diagrama frecuentemente usado para circuitos en paralelo es el de la fig. 27S. Tres resistencias R_1, R_2 y R_3 co-

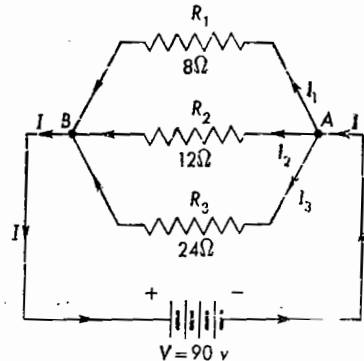


Fig. 27S. Tres resistencias en paralelo ilustrando la ley de Kirchhoff.

nectadas a una batería de 90 voltios. Para encontrar la corriente en un circuito como éste se procede a encontrar una resistencia única, R , que sustituya a la combinación en paralelo de R_1, R_2 y R_3 permitiendo el paso de la misma corriente electrónica. Esta resistencia equivalente se obtiene por la ley de las resistencias en paralelo,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (27h)$$

Para ilustrar su uso, tómese $R_1 = 8 \Omega$, $R_2 = 12 \Omega$ y $R_3 = 24 \Omega$, en la fig. 27S. Por sustitución directa en la ec. (27h)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{8} + \frac{1}{12} + \frac{1}{24}$$

Ya que el común denominador es 24,

$$\frac{1}{R} = \frac{3}{24} + \frac{2}{24} + \frac{1}{24} = \frac{6}{24}$$

de donde

$$R = \frac{24}{6} = 4 \Omega$$

Si ahora se imagina la combinación en paralelo de las tres resistencias reemplazada por una sola resistencia $R = 4 \Omega$, el circuito tendrá la forma general de la fig. 27N, y la corriente I será dada por la ley de Ohm como sigue:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{90 \text{ voltios}}{4 \Omega} = 22.5 \text{ amp}$$

Esta es la corriente total I dada por la batería al circuito en paralelo de la fig. 27S.

Para encontrar cómo se divide esta corriente en A en las tres partes I_1, I_2 e I_3 , notamos que se aplican los 90 voltios completos a los extremos opuestos de cada resistencia. Por tanto, la ley de Ohm puede aplicarse como sigue a cada resistencia:

$$I_1 = \frac{90 \text{ voltios}}{8 \Omega} = 11.25 \text{ amp}$$

$$I_2 = \frac{90 \text{ voltios}}{12 \Omega} = 7.50 \text{ amp}$$

$$I_3 = \frac{90 \text{ voltios}}{24 \Omega} = 3.75 \text{ amp}$$

Si ahora aplicamos la ley de Kirchhoff, ec. (27g), encontramos

$$I = 11.25 + 7.50 + 3.75 = 22.5 \text{ amp}$$

y esto corresponde con la corriente total. Nótese que la mayor de las tres corrientes, $I_1 = 11.25 \text{ amp}$, fluye por la menor resistencia y que la menor corriente, I_3 , fluye por la resistencia mayor.

La ley de Kirchhoff, de las corrientes, se expresa frecuentemente así:

La suma de todas las corrientes que llegan a una conexión es igual a la suma de las corrientes que salen de ella.

Si se estudia la conexión A o la conexión B de la fig. 27S, se verá que esta definición da la Ec. (27g).

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cómo se define la corriente? ¿Qué es el amperio? ¿Cuántos electrones pasan por un punto cualquiera de un alambre cuando fluye una corriente de 1 amp?
2. ¿Qué es una celda voltaica? ¿Qué es una batería? ¿Cuáles son los tres constituyentes principales de una celda?
3. ¿Qué son los iones? ¿Dónde se producen?
4. ¿Qué es la fuerza electromotriz? ¿En qué unidades se mide?
5. ¿Cuál es la fuente de la energía eléctrica en una celda? ¿Cuánta es la fem de una pila seca? ¿De un acumulador?
6. ¿De qué se compone el electrolito de un acumulador? ¿De qué elementos se componen sus electrodos?
7. ¿Qué se entiende por disociación? ¿Qué es una terminal? ¿Qué es un cátodo? ¿Qué es un ánodo?
8. ¿Cómo se conectan comúnmente las celdas de un acumulador? ¿Qué determina la fem de un acumulador?
9. ¿Cuánta es la resistencia equivalente de dos o más resistencias conectadas en serie?
10. ¿Cómo se representan en un diagrama de circuito las celdas en serie de un acumulador? ¿Cómo se representa una resistencia?
11. ¿Fluye la misma corriente por cada resistencia en una conexión en serie?
12. Si se conocen la resistencia de un circuito y el voltaje aplicado, ¿cómo puede determinarse la corriente?
13. ¿Cuál es la Ley de Ohm? ¿En qué unidades se mide cada cantidad de las que intervienen?
14. ¿Qué instrumentos eléctricos comunes son usados para determinar los factores de la Ley de Ohm?

15. Expresar la Ley de las resistencias en serie. Dar un ejemplo numérico. Hacer un diagrama del circuito de su ejemplo y rotular correctamente cada parte.

16. Expresar la ley de las resistencias en paralelo. Dar un ejemplo numérico simple. Hacer el diagrama del circuito para su ejemplo y rotular correctamente cada parte.

17. ¿Cómo se divide la corriente en un circuito en paralelo? ¿Qué resistencia lleva la mayor corriente? ¿Cuál lleva la menor corriente?

18. Si están varias resistencias en paralelo y conectadas a una batería, ¿cómo se calcula la corriente por cada resistencia? ¿Qué se mantiene igual para todas las resistencias?

19. Encontrar el voltaje a través de las baterías compuestas por las siguientes celdas conectadas en serie: a) 8 celdas húmedas; b) 60 celdas húmedas; c) 5 pilas secas, y d) 30 pilas secas. (Resp. a) 16 voltios; b) 120 voltios; c) 7.5 voltios; d) 45 voltios.)

20. Se conecta una batería de 12 voltios a una resistencia de 15 ohmios. Calcular la corriente.

21. La lámpara de una linterna de tres celdas tiene una resistencia de 19 ohmios. Encontrar la corriente proporcionada por la batería cuando se enciende la linterna. (Resp. 0.237 amp.)

22. Una linterna de 2 celdas tiene una resistencia de 12 ohmios. Encontrar la corriente que fluye cuando se enciende.

23. Un tostador eléctrico conectado a un circuito de 120 voltios, toma una corriente de 3.6 amperios. ¿Cuál es la resistencia? (Resp. 33.3 ohmios.)

24. Una plancha eléctrica, conectada a una fuente de potencia de 110 voltios, toma una corriente de 5 amperios. Calcular la resistencia.

25. Se usa una batería de 5 pilas secas en serie en una linterna que tiene una lámpara con resistencia de 22 ohmios. ¿Qué corriente fluye cuando se enciende la luz? (Resp. 0.34 amp.)

26. Un acumulador de 12 voltios surte una corriente de 48 amp cuando se conecta

el motor de arranque de un auto. ¿Cuál es la resistencia del motor de arranque (marcha)?

27. Se conectan en serie tres resistencias de 10, 15 y 20 ohmios con una batería compuesta por 45 pilas secas. Calcular la corriente que pasa por el circuito. (Resp. 1.5 amperios.)

28. Seis resistencias de 5, 10, 18, 24, 38 y 12 ohmios, respectivamente, son conectadas en serie con un acumulador de 12 celdas. Encontrar la corriente que pasa por el circuito.

29. Tres resistencias de 4, 5 y 6 ohmios van a conectarse por pares en serie a una batería de 120 voltios. Encontrar la corriente en cada uno de los tres casos. (Resp. 13.3, 12.0 y 10.9 amp.)

30. Una conexión de 7 foquitos de Navidad, cada uno con 60 ohmios de resistencia, es conectada en serie al circuito de alumbrado doméstico de 110 voltios. Encontrar la corriente.

31. Tres resistencias, $R_1 = 17 \Omega$, $R_2 = 14 \Omega$ y $R_3 = 10 \Omega$ son conectadas en serie a una batería de 10 pilas secas. Calcular la corriente. (Resp. 0.366 amp.)

32. Dos resistencias de 6 y 12 ohmios, respectivamente, son conectadas en paralelo a una batería que surte una diferencia de potencial de 20 voltios. Encontrar: a) la resistencia equivalente al circuito en paralelo; b) la corriente total, y c) la corriente que pasa por cada resistencia.

33. Dos resistencias de 10 y 30 ohmios, respectivamente, son conectadas a una batería de 45 voltios. Encontrar: a) la resistencia equivalente al circuito en paralelo; b) la corriente total dada por la batería, y c) la corriente que pasa por cada resistencia. (Resp. a) 7.5 ohmios; b) 6.0 amperios; c) 1.5 y 4.5 amperios.)

34. Tres aparatos de 6, 18 y 36 ohmios, respectivamente, son conectados en paralelo a una batería de 90 voltios. Encontrar: a) la resistencia equivalente al circuito en paralelo; b) la corriente total surtida por la batería, y c) la corriente electrónica que pasa por cada aparato.

35. Tres parrillas de 4, 5 y 20 ohmios, respectivamente, son conectadas en paralelo a una batería de 48 voltios. Encontrar: a) la resistencia del circuito, b) la corriente total, y c) la corriente que pasa por cada parrilla. (Resp. a) 2 ohmios; b) 24 amp; c) 2.4, 9.6 y 12 amp.)

36. Cuatro aparatos de 5, 6, 10 y 30 ohmios, respectivamente, son conectados en paralelo a un circuito doméstico de alumbrado que es capaz de mantener $V = 120$ voltios. Encontrar: a) la resistencia equivalente al circuito en paralelo; b) la corriente

total surtida por el circuito de alumbrado, y c) la corriente que pasa por cada aparato.

37. Dos resistencias de 5 y 20 ohmios, respectivamente, son conectadas en paralelo. Este circuito en paralelo se conecta en serie con una resistencia de 8 ohmios y el circuito completo se conecta a una batería de 60 voltios. Encontrar la resistencia equivalente: a) a la combinación en paralelo, y b) al circuito completo. c) Encontrar la corriente que circula por cada resistencia. (Resp. a) 4.0 ohmios; b) 12 ohmios; c) 1.0, 4.0, 5.0 amp.)

MAGNETISMO

Los filósofos griegos ya conocieron el magnetismo. Hay una historia de un pastor, llamado Magnes, que, estando en el Monte Ida de la Isla de Creta, fue atraído tan fuertemente hacia el suelo por la punta de su bastón y los clavos de sus sandalias, que se le hizo difícil moverse. Al remover la tierra para encontrar la causa de esta atracción, descubrió una piedra que tenía la notable propiedad de atraer al hierro. Ahora, esta piedra se llama magnetita o piedra de imán.

La idea de que se puede usar una piedra imán como brújula también es muy antigua. Hay algunas pruebas de que los chinos lo sabían en el año 121 de la Era Cristiana. De cualquier forma, a principios del siglo XII, un autor chino explicó que una aguja frotada con una piedra imán y suspendida con libertad de girar, señala hacia el Sur. Ésta parece ser la primera evidencia de que se puede imanar un trozo de hierro por medio de una piedra imán y usarla como brújula. En la figura 28A(a) y (b), se ve la acción de una piedra imán o una barra imanada, suspendidas con libertad de girar en torno a un eje vertical.

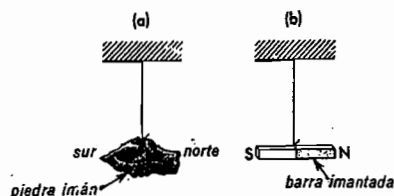


Fig. 28A. Una piedra imán o una barra magnetizada señalan el Norte y el Sur.

Las brújulas hechas para demostración consisten, generalmente, en una aguja recta de acero que ha sido magnetizada y montada con libertad de girar sobre una varilla con punta, como se ve en la fig. 28B. En los primeros días de la brújula náutica, se acostumbraba hacer flotar sobre agua varias agujas imanadas colocadas sobre trozos de madera o algún otro material ligero. En los diseños más recientes, la aguja de la

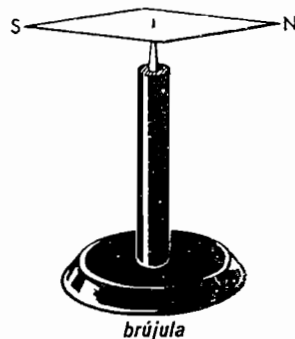


Fig. 28B. La brújula señala hacia el Norte.

brújula, con un rubí en el centro, se monta sobre la punta aguda de una varilla de metal duro, mucho más corta que la que se ve en la fig. 28B, y se coloca dentro de una pequeña caja de latón con cubierta de vidrio. Estas brújulas son las más conocidas.

28.1 Imanes. Hasta hace unos años los imanes se hacían con acero endurecido, moldeado o laminado en distintas formas. Quizá el más común de éstos es el imán de herradura que se ve en la fig. 28C, o el imán recto que se ve en la fig. 28D. Actualmente, los imanes más potentes se hacen

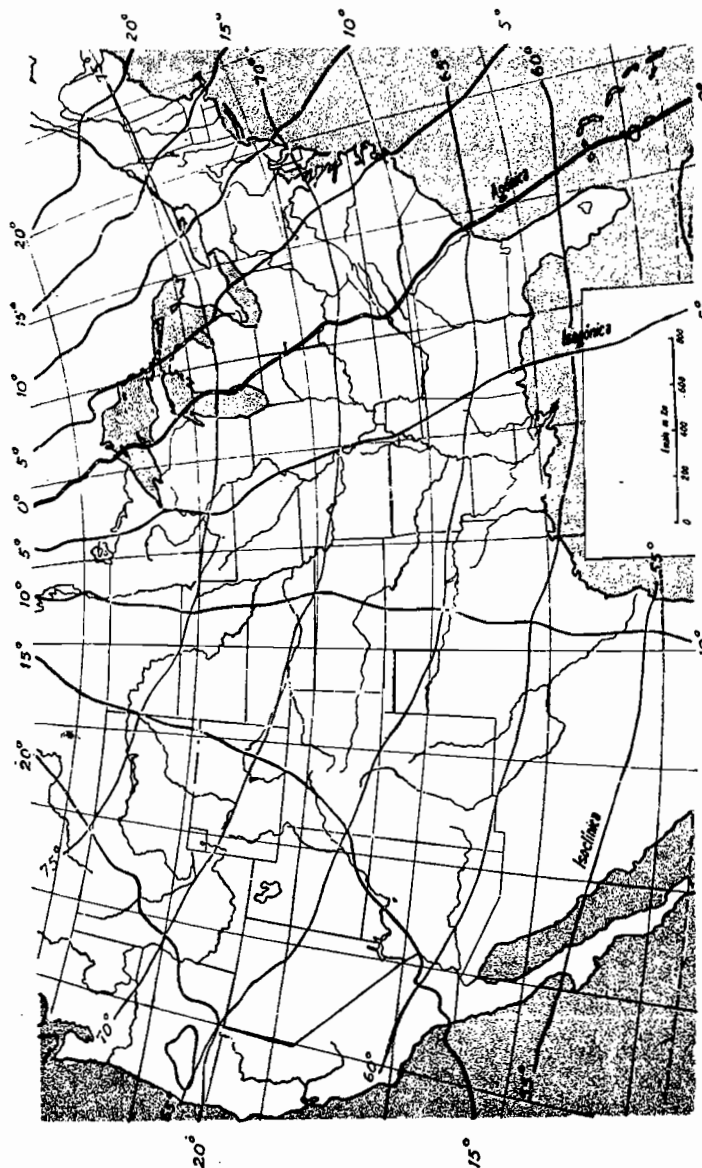


Fig. 28 M.—Mapa magnético de Estados Unidos de América para 1954, con la declinación magnética y el ángulo de inclinación. Estos mapas se trazan con los datos recogidos por la Oficina de Exploración Geodésica y de Costas.

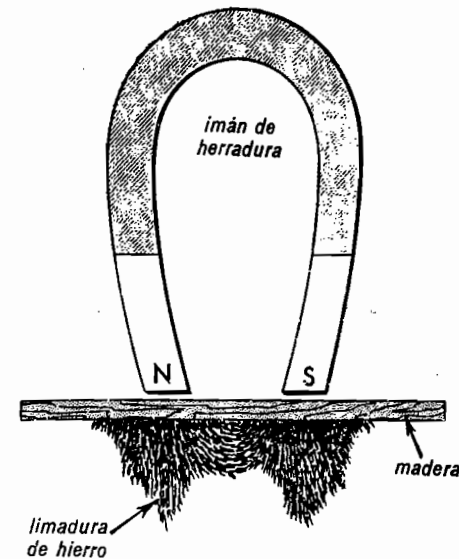


Fig. 28C. El imán atrae al hierro a través de cualquier sustancia.

con una aleación que contiene aluminio, cobalto, níquel y hierro. Los imanes pequeños de esta aleación son suficientemente fuertes para levantar objetos cientos de veces más pesados que ellos.

El hierro puro, a veces llamado hierro dulce, no conserva su magnetismo y, por lo tanto, es inútil para la fabricación de los imanes llamados permanentes. El hierro

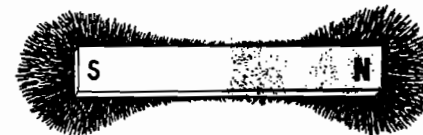


Fig. 28D. El imán atrae más fuertemente las limaduras de hierro cerca de los extremos. Estas regiones de mayor atracción son llamadas polos magnéticos.

dulce se usa en cambio, en la construcción de los electroimanes. Estos aparatos serán explicados en el Capítulo 29. De las muchas aplicaciones de los imanes permanentes, quizá las más comunes son la brújula, el receptor telefónico y el altavoz de radio.

28.2 El poder de atracción. Casi todos hemos jugado en alguna ocasión con un pe-

queño imán de herradura, y hemos descubierto por nosotros mismos que atrae sólo a los objetos que contienen hierro. Arrastrando el imán entre el polvo o la arena seca, es probable que recoja granitos de mineral de hierro.

Si se experimenta más ampliamente, se puede demostrar que los imanes atraen a las sustancias magnéticas a cierta distancia, aun cuando haya materia en el espacio intermedio. En otras palabras, la atracción magnética se manifiesta a través de cualquier sustancia. En la fig. 28C se ve cómo se puede demostrar esto, recogiendo limaduras de hierro a través de una tabla delgada de madera al poner el imán en el otro lado. Si se coloca en medio una lámina de cobre o de latón, o de cualquier sustancia, la atracción persiste. Se puede aislar parcialmente de los campos magnéticos una pequeña región del espacio si se la rodea completamente con capas de hierro dulce.

Aunque hay algunos metales que son atraídos débilmente por un imán, la mayoría de las sustancias como el aluminio, cobre, plata, oro, madera, vidrio, papel, etc., no sufren ningún efecto apreciable. Entre las sustancias que son atraídas débilmente, el níquel y el cobalto son los más importantes. Estos dos metales, como se menciona antes, al entrar en aleación con otros metales en proporciones apropiadas, manifiestan una susceptibilidad magnética más elevada que el hierro o el acero de la mejor calidad. Como elemento puro, sin embargo, el hierro es muy superior a todos los demás en su calidad magnética.

28.3 Polos magnéticos. Metiendo una barra imanada, recta, en el interior de una caja llena de limaduras de hierro, se observa que las pequeñas limaduras se adhieren a los extremos de la barra en la forma en que se ve en la fig. 28D. Estas regiones de mayor atracción son los *polos magnéticos*. Si se suspende este imán mediante un hilo, como se ve en la fig. 28A(b), quedará en reposo en una posición cercana a la dirección Norte-Sur. El extremo que señala ha-

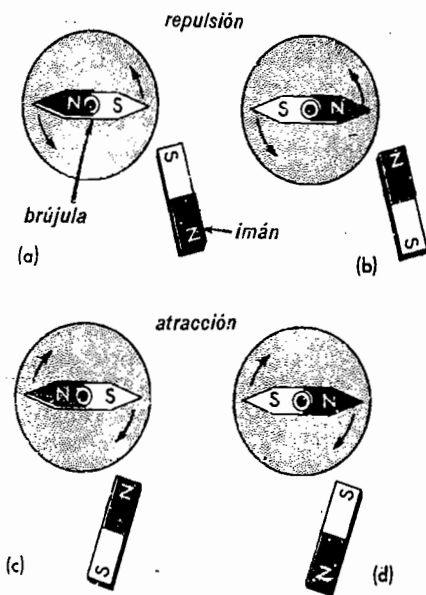


Fig. 28E. Cuando se acerca un polo de un imán a otro imán, se encuentra que los polos iguales se repelen y los contrarios se atraen.

cia el Norte será llamado, por eso, *polo buscador del Norte* o *polo N*, y el otro será el *polo buscador del Sur* o *polo S*.

Puede mostrarse la diferencia que existe entre los polos *N* y *S* de un imán, acercándolo a una brújula. En la fig. 28E se muestra este experimento. Cuando el polo *S* del imán se acerca al polo *S* de la brújula, como en el diagrama (a), hay una fuerza de repulsión que actúa sobre la brújula haciéndola girar alejándose del imán. Ocurre también una repulsión semejante entre los dos polos *N*, como se ve en el diagrama (b). En cambio, si se acercan un polo *N* y un polo *S*, se produce una fuerte atracción y la brújula gira hacia el imán, como se ve en los diagramas (c) y (d). Estos

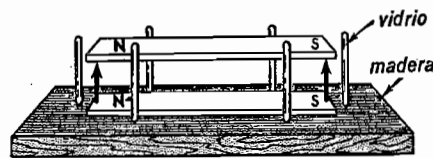


Fig. 28F. Puede sostenerse un imán en el aire por la repulsión de los polos iguales de otro imán.

experimentos demuestran, por lo tanto, que existen dos clases de polos, y que los polos iguales se rechazan y los polos contrarios se atraen.

Ahora se pueden hacer imanes permanentes tan fuertes que puede ser levantado un imán por la repulsión ejercida por otro. En la fig. 28F se indica esto. Es necesaria la presencia de varillas de vidrio o de alguna otra sustancia que sirvan como guía, pues de lo contrario el imán flotante se moverá hacia un lado y caerá. En otras palabras, la fuerza de repulsión es tal que la barra superior no se encuentra en equilibrio estable. Si el imán flotante se invierte en su posición, quedan adyacentes los polos opuestos y los imanes se atraen entre sí. Aunque las fuerzas pueden ser suficientemente grandes, nadie ha logrado aún hacer flotar un imán permanente en medio del aire, contra la atracción de la gravedad y sin guías, por medio de otros imanes permanentes.

Se debe notar que los polos magnéticos de un cuerpo imanado, no están confinados a un solo punto, sino que se extienden en una región más o menos amplia; pero desde cierta distancia, las regiones polares actúan como si estuvieran concentradas cada una en un punto. La situación es semejante al centro de masa que estudiamos en mecánica.

28.4 Los polos existen por pares. Si se rompe un imán por la mitad en un intento por separar sus polos, se encuentra uno con que se forman nuevos polos en los bordes producidos por la rotura. Si se vuelve a romper uno de estos pedazos, se encuentra que cada trozo tiene otra vez dos polos de nombre contrario. Por mucho que se repita este proceso, se obtiene siempre el mismo resultado: un polo magnético va siempre acompañado por otro polo opuesto.

Esto se demuestra imanando una hoja de segueta y rompiéndola sucesivamente en pedazos cada vez más pequeños, como se ve en la fig. 28F. Cada vez que se rompe un pedazo y es probado con una brújula, se encuentra que cada fragmento tiene un

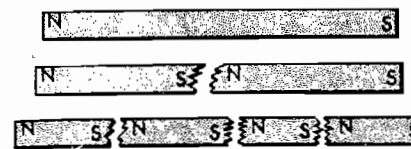


Fig. 28G. Los polos magnéticos existen por pares. Si se rompe un imán aparecen polos en los dos lados de la rotura de modo que cada pedazo tiene dos polos.

polo *N* en un lado y un polo *S* en el otro. Se puede magnetizar fácilmente la hoja de segueta frotándola de un extremo a otro con un polo magnético.

Se puede imanar una barra de acero de manera que tenga tres o más regiones polares. En la fig. 28H se ilustra esto con una



Fig. 28H. Las limaduras de hierro señalan tres regiones polares.

hoja de segueta que se ha magnetizado con un polo *N* en cada extremo y un polo *S* en el centro. La intensidad combinada de los polos norte resulta ser igual a la del polo sur del centro, lo que se hace visible por la cantidad de limaduras de hierro fijadas por cada lado. Podríamos decir, por lo tanto, que el imán tiene cuatro polos, un polo norte en cada extremo y dos polos sur en el centro.

28.5 El campo magnético. En el espacio que rodea a cada imán existe un campo magnético. Este campo no es visible; pero puede demostrarse que existe, y trazarlo de la siguiente manera:

Si se coloca una brújula pequeña en algún punto cercano al polo *N* de la barra imanada recta, y luego se va alejando en la dirección en que señala la brújula, el centro de la brújula trazará una línea continua llamada *línea magnética de fuerza*. Partiendo de diferentes puntos, se pueden trazar muchas de estas líneas y obtener un diagrama como el de la fig. 28I. Todas las

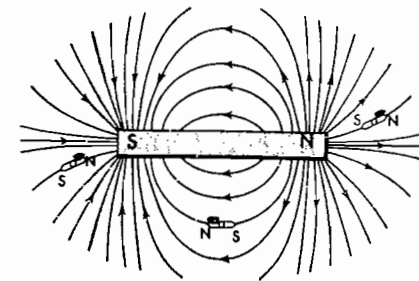


Fig. 28I. Líneas de fuerza y campo magnético en torno de un imán determinadas por medio de una brújula.

líneas empiezan en algún punto cercano al polo *N* y terminan en un punto cerca del polo *S*.

Estas *líneas magnéticas de fuerza* no tienen una existencia real; no son más que recursos útiles que se usan al describir los fenómenos magnéticos que se verán en el siguiente capítulo. Debe notarse que, cerca de los polos, donde el imán ejerce mayor atracción, las líneas se encuentran más cercanas entre sí y cada línea sale del polo *N* y se dirige hacia el polo *S*. Este sentido es asignado arbitrariamente, por ser la dirección señalada por el polo *N* de la brújula.

Una observación cuidadosa de las limaduras de hierro que se adhieren a un imán hace ver que cada pequeña partícula de hierro en forma de aguja se alinea en la dirección de las líneas magnéticas de fuerza. Ver. figs. 28D y 28H. La razón de esto es que cada limadura se magnetiza convirtiéndose en un imán; y, al tener sus propios polos *N* y *S*, actúa como una brújula. Se

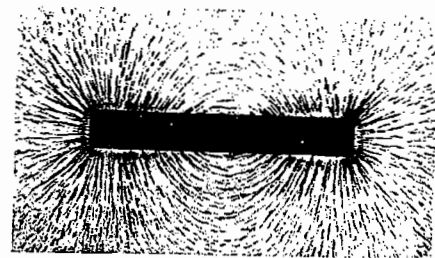


Fig. 28J. Fotografía de las limaduras de hierro alineadas por el campo magnético de un imán recto permanente.

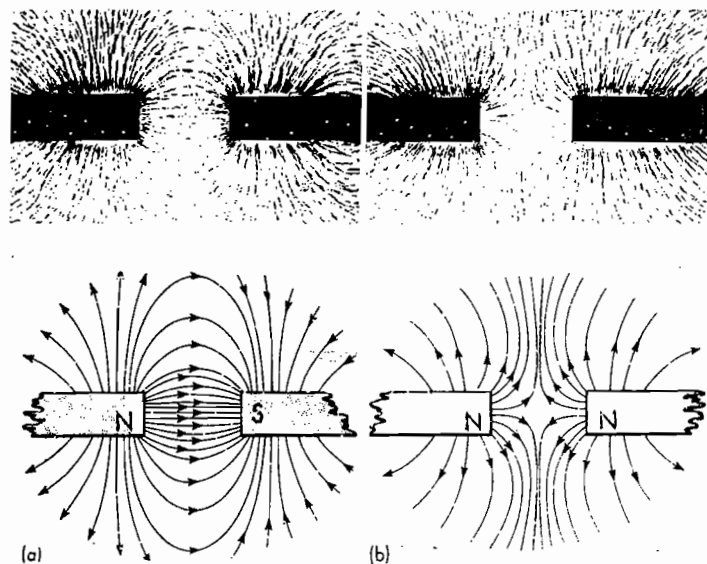


Fig. 28K. Diagramas y fotografías del campo magnético en torno de pares de polos magnéticos.

puede hacer una muy buena demostración de la existencia del campo y de su dirección colocando una placa de vidrio o una hoja de papel sobre un imán y espolvoreándolo con limaduras de hierro por encima. Golpeando suavemente la placa de vidrio o el papel, se mueven dichas limaduras y se alinean como se ve en la fotografía presentada en la fig. 28J.

28.6 El campo formado por polos separados. Cuando se acercan dos polos magnéticos, la acción mutua de los dos es tal que producen un campo magnético combinado. En la fig. 28K se ven dibujos hechos mediante el uso de brújulas y fotografías obtenidas con el método de las limaduras de hierro.

Puede darse una explicación simplificada de muchos fenómenos eléctricos y magnéticos considerando que estas líneas imaginarias de fuerza tienen ciertas propiedades. Consideradas en su dirección longitudinal, actúan como si fueran tiras de goma estiradas bajo una constante tensión, mientras que lateralmente actúan como si se rechazaran unas a otras. En la fig. 28K se ilustran

estas dos propiedades. Cuando los dos polos son diferentes, como en el esquema (a), las líneas de fuerza actúan como si fueran tiras de goma estirada y tienden a acercar un polo hacia el otro. En el diagrama (b), donde los polos son de nombres iguales, las líneas se rechazan unas a otras, alejando los polos entre sí.

28.7 El campo magnético de la Tierra. Debemos a sir William Gilbert la visión de que la Tierra es un gran imán. Para probar esta teoría, Gilbert modeló una piedra imán en forma esférica, y demostró que una pequeña brújula colocada en cualquier punto de este globo, señalaba en una dirección igual a la que señala en la Tierra, hacia el Polo Norte.

Por esto se ha dibujado la Tierra esquemáticamente en la Fig. 28L como una esfera de hierro imanado, como si tuviera dentro una barra imanada permanente recta y muy grande. Como el eje magnético está en una dirección que forma un ángulo con el eje polar, los dos polos magnéticos de la Tierra no coinciden con los polos Norte y Sur geográficos. Estos últimos son los puntos

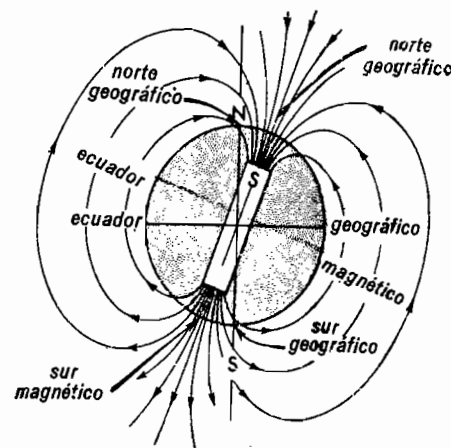


Fig. 28L. La Tierra, considerada como un gran imán, rodeada por un campo magnético que se extiende en una región muy amplia del espacio.

situados en los extremos del eje de rotación de la Tierra.

El *Polo Norte magnético* está en el Norte del Canadá, mientras que el *Polo Sur magnético* se encuentra casi diametralmente opuesto en el hemisferio sur. Por lo que se refiere a su nombre magnético o polaridad, el Polo Sur magnético es un polo N. Esto resulta evidente al considerar que las líneas magnéticas de fuerza siempre parten de un polo N y terminan en un polo S.

Aunque todavía no se comprende completamente la causa del magnetismo de la Tierra, se han propuesto varias teorías razonables. Se sabe que la Tierra contiene grandes depósitos de minerales de hierro, siendo algunos de ellos de hierro casi puro. Una teoría propone que en las épocas pasadas todos estos depósitos de hierro se magnetizaban gradualmente y casi con la misma orientación, y que todos juntos actúan como si fueran un gran imán permanente. Otra teoría, muy factible, dice que el magnetismo se debe a las grandes corrientes eléctricas que fluyen en torno a la Tierra, no sólo en la corteza terrestre, sino también en la atmósfera. Estas corrientes terrestres parecen estar relacionadas en cierta forma directa

con la rotación de la Tierra. Parece confirmarse esto por el hecho de que la Tierra está imanada en una dirección casi paralela al eje polar terrestre.

28.8 Declinación magnética. Ya que no coinciden los polos magnéticos y geográficos de la Tierra, generalmente las brújulas no señalan hacia el verdadero Norte. Debido a la influencia de los depósitos irregulares de hierro cerca de la superficie de la Tierra, el campo magnético no es tan regular como se presenta en la fig. 28K, y la brújula, en algunos lugares, se desvía considerablemente del norte magnético. El ángulo que se desvía la brújula del Norte geográfico recibe el nombre de *ángulo de declinación*.

En la fig. 28M se presenta un mapa con los ángulos de declinación que existían en los Estados Unidos de Norteamérica en el año de 1954. Las líneas irregulares más o menos verticales, unen los puntos de igual declinación, y se llaman *líneas isogónicas*. En cualquier punto de la línea marcada 20° E, por ejemplo, la brújula señala 20° al este de la verdadera dirección Norte. En la región de San Francisco se ve que la declinación es de cerca de 18° E, mientras que en la región de Nueva York es cercana a 11° Oeste. La línea que une los puntos donde la brújula señala al norte verdadero, tiene 0° de declinación y se llama *línea agónica*.

28.9 Inclinación magnética. Si se monta una aguja magnetizada de manera que ten-

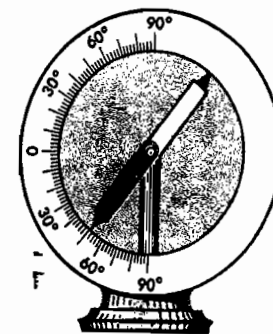


Fig. 28N. Una aguja de inclinación magnética.

ga libertad de girar en torno a un eje horizontal, como se ve en la fig. 28N, la aguja no quedará en reposo en la posición horizontal, sino que se inclinará un cierto ángulo respecto a la horizontal. Esta dirección, llamada *inclinación*, se fija por el ángulo que forma el campo magnético de la Tierra con la superficie de ésta, en el punto considerado. Refiriéndonos a la fig. 28L se ve que el ángulo de inclinación es bastante grande en los extremos Norte y Sur, mientras que cerca del Ecuador es pequeño. El diagrama (a) de la fig. 28O, indica la in-

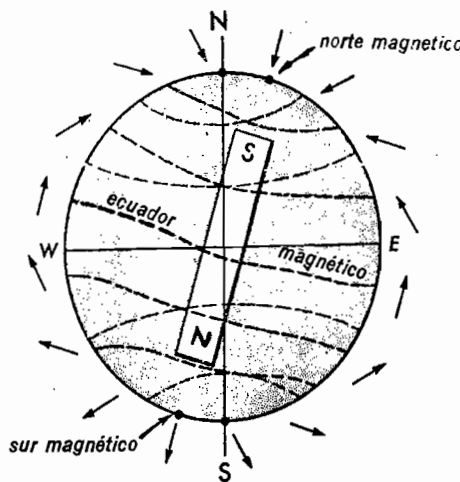


Fig. 28O. Las flechas señalan la dirección que marca una aguja de inclinación en diferentes partes de la superficie terrestre.

clinación aproximada en diferentes latitudes sobre una sección transversal del globo terrestre. En la región de la Península Boothia, al norte de la Bahía de Hudson y a 20° del Norte geográfico, la aguja de inclinación se coloca vertical, perpendicular a la superficie terrestre y localiza el Polo Norte magnético. En una región a unos 18° del Polo Sur geográfico, la aguja de inclinación se pone vertical hacia arriba, a 90° con la horizontal, y localiza el Polo Sur magnético.

En los mapas magnéticos, se unen todos los puntos que tienen la misma inclinación

magnética, mediante unas líneas que se llaman *isoclínicas*. En la fig. 28M se representan estas líneas indicando los diferentes ángulos de inclinación en el mapa de los Estados Unidos de Norteamérica.*

Se ha demostrado, mediante medidas cuidadosas de la *declinación* y la *inclinación*, que el campo magnético de la Tierra cambia continuamente. Estos cambios son extremadamente pequeños y tienen cierta periodicidad, aunque a veces son bastante irregulares.

En la sección 28.5 se representó gráficamente al campo magnético de una región del espacio, usando lo que llamamos *líneas magnéticas de fuerza*. A fin de especificar la fuerza o intensidad de un campo magnético en cualquier punto del espacio, se usa una cantidad vectorial llamada *inducción magnética B*. La dirección de la *inducción magnética B* en cualquier punto, es tangente a la línea de fuerza que pasa por ese punto y su magnitud es proporcional a la fuerza que el campo ejerce sobre un polo N unidad, colocado allí. Estas líneas de fuerza son también llamadas *líneas de inducción*.

28.10 Magnetización. Cuando se acerca un imán potente a una pieza de hierro dulce, éste adquiere todas las propiedades de un nuevo imán, pero más débil. En la figura 28P(a) se ilustra este fenómeno, llamado *magnetización*. Mientras se mantiene el imán permanente cerca de la barra de hierro dulce, ésta atraerá limaduras de hierro con su extremo. Cuando se retira el imán permanente, el hierro dulce pierde su magnetismo inmediatamente, y las limaduras de hierro se caen.

Cuando se magnetiza una pieza de hierro se crea un polo de nombre contrario en el punto más cercano al imán permanente,

* B expresa la intensidad del campo magnético. En el sistema mks de unidades se expresa en webers/m², mientras que en el sistema cgs se da en gauss. En San Francisco, la inducción magnética terrestre B es cerca de 5.4×10^{-5} webers/metro², ó 0.54 gauss y el ángulo de inclinación es cercano a 62°. Esto da una componente horizontal de 0.25×10^{-4} webers/metro² ó 0.25 gauss.

como se ilustra en el diagrama. Si se acerca un clavo corriente de hierro al polo N de un imán permanente, se magnetizará con un polo S en el punto de contacto y un polo N en el otro extremo, como se ve en el esquema (b). Teniendo dos polos, el clavo está magnetizado y puede atraer a otro clavo y magnetizarlo a su vez en la misma forma.

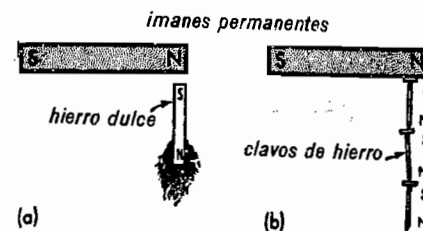


Fig. 28P. El hierro dulce se puede magnetizar por inducción a cierta distancia, o por contacto.

Con un imán potente puede repetirse varias veces este proceso agregando un clavo después de otro.

Ahora se ve claro cómo las limaduras de hierro se alinean con las líneas magnéticas de fuerza del imán. Cada limadura se magnetiza y al ser un pequeño imán, se coloca paralelo al campo en que se encuentra.

28.11 Teoría molecular del ferromagnetismo. La teoría moderna del magnetismo, que ya se encuentra firmemente establecida, dice que un trozo de hierro consiste en millares de pequeños imanes elementales. Estos imanes ultramicroscópicos, pueden consistir en átomos o moléculas individuales o en grupos de átomos alineados para formar cristales elementales de hierro. La explicación del magnetismo del átomo individual se presentará más adelante. Antes de que una pieza de hierro o de acero se magnetice, se puede pensar que estos imanes elementales están orientados en forma más o menos arbitraria en la masa del metal, como se ve en la fig. 28Q.

Al tiempo en que se está magnetizando la pieza de hierro, los imanes elementales giran para alinearse paralelos entre sí y paralelos al campo magnetizante, como se representa esquemáticamente en el diagrama (b). Una vez alineados en esta forma, los pequeños polos N y S quedan adyacentes y anulan el efecto que tendrían sobre los objetos exteriores. En un extremo habrá muchos polos N y en el extremo opuesto habrá un número igual de polos S libres.

Cuando se rompe un imán en cualquier punto, se dejan expuestos los polos S en un lado de la rotura y los polos N en el otro.

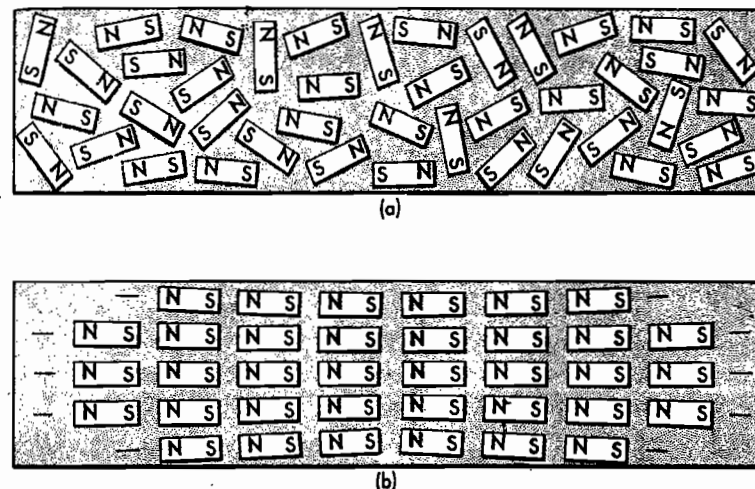


Fig. 28Q. Imanes elementales de una pieza de hierro; (a) no magnetizada, (b) magnetizada.

Ahora se ve muy claro por qué al romper un imán, los pedazos tienen siempre su polo norte y su polo sur cada uno, sin importar cuántos pedazos resulten.

Cuando se magnetiza por inducción el hierro dulce, y se aleja después el imán per-

manente, los imanes elementales regresan a su posición desordenada original; pero, cuando se magnetiza acero templado, siguen alineados después de que se aleja el campo magnético.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Qué es una barra imán? ¿Qué es un imán de herradura?
2. ¿Qué son los polos magnéticos? Diga cuántas clases de polos hay ¿Cómo se llaman? ¿Cuál es el origen de estos nombres?
3. ¿Se pueden hacer los imanes suficientemente fuertes para levantarse uno a otro por repulsión?
4. Un polo magnético, ¿es un punto o un área distribuida de la superficie de un imán? ¿Puede un imán tener un solo polo? ¿Pueden separarse los polos de un imán rompiéndolo?
5. ¿Puede un imán tener más de dos polos? ¿Puede tener 1 000 polos?
6. ¿Qué es la inducción magnética? ¿Cómo puede demostrarse?
7. ¿Cuál es la teoría molecular del magnetismo? ¿En qué difieren el comportamiento del hierro dulce y del acero?
8. ¿Señala la brújula siempre al norte verdadero? ¿Señala alguna vez al norte verdadero?
9. ¿Qué es la declinación magnética? ¿Por qué se produce?
10. ¿Qué se entiende por inclinación magnética? ¿Cómo se determina?
11. ¿Qué es la línea agónica? ¿Qué es una línea isogónica? ¿Qué es una línea isoclínica?
12. ¿Se mantiene siempre igual el campo magnético de la Tierra?
13. ¿Por qué son tan irregulares de un punto a otro las líneas isogónicas?
14. ¿Qué es un campo magnético? ¿Puede verse? ¿Puede detectarse? ¿Puede delinearse un campo magnético?
15. ¿Puede dibujar de memoria el campo magnético que rodea a una barra imán recta con dos polos?
16. ¿Puede dibujar de memoria el campo magnético de dos imanes con sus polos iguales próximos?
17. ¿Puede dibujar de memoria el campo magnético de dos imanes con sus polos contrarios próximos?
18. ¿Puede dibujar de memoria el campo magnético de la Tierra? ¿Puede rotular los cuatro polos y los dos ecuadores?

29

EFFECTOS DE LA CORRIENTE ELECTRICA

Todos estamos más o menos familiarizados con los aparatos eléctricos de la vida moderna (las lámparas eléctricas, tostadores, planchas, refrigeradores, aspiradoras, máquinas lavadoras, etc.). El funcionamiento de todos estos aparatos depende de uno o más de los cuatro efectos generales producidos por la corriente eléctrica; éstos son: 1) *el efecto térmico*, 2) *el efecto magnético*, 3) *el efecto mecánico*, 4) *el efecto luminoso* y 5) *el efecto químico*. El propósito de este capítulo es considerar los primeros tres efectos mencionados y entrar, más o menos en detalle, en los principios importantes que los rigen.

29.1 El efecto térmico de la corriente eléctrica. Cuando circula una corriente eléctrica por un alambre, se genera calor y sube la temperatura del mismo. Si se aumenta la corriente, aumenta rápidamente la proporción con que se genera el calor, hasta que el alambre brilla con una luz roja oscura. Un mayor aumento de la corriente calentará el alambre hasta una temperatura que lo pone al rojo amarillo o al rojo blanco. Más allá de este punto, si es que no ha sucedido antes, el alambre llegará a una temperatura a la cual se funde.

Que el alambre sólo se entibie por la corriente de electrones o se caliente hasta la incandescencia, depende de un grupo de factores, de los cuales los dos principales son la corriente y la resistencia. Experimentalmente se prueba que la cantidad de calor producida en un alambre es directamente proporcional: 1) *a la resistencia R*,

2) *al cuadrado de la intensidad de la corriente de electrones, I , y 3) al tiempo t .*

Expresado como ecuación algebraica,

$$\text{calor} = kI^2Rt \quad (29a)$$

donde k es el factor de proporcionalidad. Para poder calcular exactamente la cantidad de calor producida en calorías, se debe conocer el valor de k . Este fue determinado experimentalmente por James Joule, un físico inglés, en 1843, y posteriormente por muchos otros experimentadores, encontrándose que tiene el valor de 0.24 cal/julio. Si se mide la corriente de electrones en *amperios*, la resistencia en *ohmios* y el tiempo en *segundos*, entonces,

$$\text{calor en calorías} = 0.24 I^2Rt \quad (29b)$$

La ecuación (29a) se conoce como la ley de Joule.

Ya que el calor es una forma de energía, la ley de Joule puede considerarse como otro aspecto de la ley de la conservación de la energía. Cuando una cantidad de energía eléctrica, I^2Rt , se gasta o se transforma en calor, siempre produce la misma cantidad de calorías.

Para calcular el calor generado en un circuito eléctrico, estúdiese el siguiente problema sencillo.

Ejemplo 1. Si el elemento calentador de un tostador eléctrico tiene una resistencia de 22 ohmios y se conecta a un circuito ordinario eléctrico de 110 voltios, ¿cuánto calor se genera en un minuto?

Solución. Por la Ley de Ohm, ec. (27d), se calcula primero la corriente de electrones.

$$I = 110/22 = 5 \text{ amp}$$

Usando la Ley de Joule, al sustituir los valores en la ec. (29b),

$$\text{calor} = 0.24 \times (5)^2 \times 22 \times 60 = 7920 \text{ cal}$$

Como la ecuación (27d) nos dice que la resistencia $R = V/I$, la sustitución de V/I en vez de R en la ecuación (29b), nos da una forma más útil de la ley de Joule, que es,

$$\text{calor en calorías} = 0.24IVt \dots (29c)$$

donde I está en amperios, V en voltios y t en segundos.

Para algunos aparatos eléctricos es deseable el efecto calentador, mientras que en otros es causa de molestias y aun de peligro. Por ejemplo, una plancha eléctrica, una parrilla o un tostador, tienen como objetivo principal la producción de calor. En estos aparatos se pasa una corriente relativamente grande de varios amperios, por una espiral o elemento de alambre especial que tiene

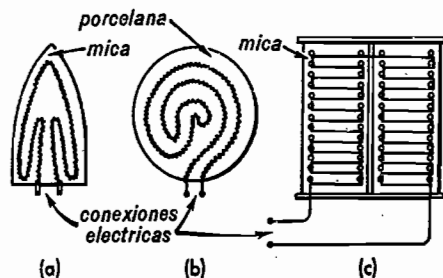


Fig. 29A. Elementos calentadores de varios aparatos eléctricos de uso común: (a) plancha, (b) parrilla o estufa, (c) tostador de pan.

una resistencia de varios ohmios. Como regla general, el alambre se hace de alguna aleación, como el nicromo, y de un tamaño tal que el calor producido no eleve su temperatura más allá del rojo. En la fig. 29A se ven diagramas de los elementos calentadores típicos, usados en tres aparatos domésticos.

29.2 Efecto magnético, experimento de Oersted. El descubrimiento de la relación entre la electricidad y el magnetismo, fue hecho por Oersted,* en 1820. En sus clases en la Universidad de Copenhague, con frecuencia había demostrado Oersted la no existencia de una relación entre la electricidad y el magnetismo. Acostumbraba colocar un alambre que llevaba corriente en ángulo recto con una brújula colocada directamente debajo del alambre, y hacer ver que no se producía ningún efecto entre

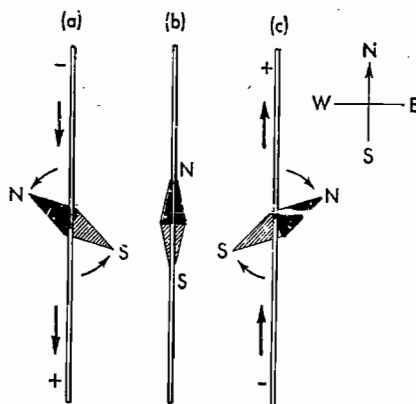


Fig. 29B. Experimento de Oersted ilustrando el efecto de una corriente de electrones sobre una brújula.

ellos. En cierta ocasión, al terminar su clase, cuando algunos de sus oyentes se acercaron a la mesa del salón, colocó el alambre paralelo con la aguja de la brújula, y sin esperarlo remotamente, vio que la aguja se movía hacia un lado (ver la fig. 29B). Al invertir la corriente en el alambre, para

* Hans Christian Oersted (1777-1851), científico danés. Hijo de un farmacéutico, pasó Oersted su infancia aprendiendo por sí mismo aritmética. A la edad de 12 años ayudaba a su padre en la farmacia, y por eso se interesó en la química. Pasando los exámenes de admisión de la Universidad de Copenhague, a los 17 años, entró a la escuela de medicina para graduarse seis años después con el doctorado. A los 29, regresó a la Universidad, pero ahora como profesor de física. En una de sus demostraciones en la clase de química y metafísica, descubrió el efecto magnético que lleva su nombre. El descubrimiento no sólo le trajo muchas donaciones y premios, sino que lo hizo una de las personalidades más eminentes de su país.

su sorpresa y perplejidad, la brújula se desvió en dirección opuesta. Resulta que este gran descubrimiento se hizo en forma bastante accidental, pero, como dijo Lagrange, refiriéndose a Newton en una ocasión semejante, "estos accidentes sólo ocurren a aquellos que lo merecen".

29.3 La regla de la mano izquierda. El experimento de Oersted es interpretado como una demostración de que hay un campo magnético alrededor de cualquier alambre que lleve una corriente de electrones. La dirección de este campo magnético puede encontrarse en cada punto por medio de una pequeña brújula o con limaduras de hierro, como se hace alrededor de una barra imantada. Si se monta un alambre vertical pasando por un agujero hecho en una placa de vidrio (o de otro material no conductor) y luego se espolvorean limaduras de hierro sobre la placa, habrá un alineamiento de éstas paralelo a la inducción magnética. Los resultados demuestran que las líneas magnéticas de fuerza o líneas de inducción, son círculos concéntricos cuyo plano forma un ángulo recto con la corriente. En la fig. 29C se ilustra este efecto.

La regla de la mano izquierda, usada en electromagnetismo, da siempre la dirección de la inducción magnética debida a la corriente de electrones en un alambre. Experimentalmente se ha derivado la regla que dice que si se toma con la mano izquierda

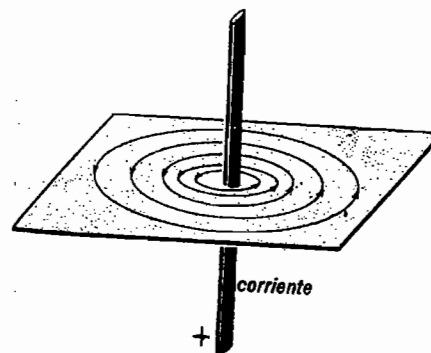


Fig. 29C. Inducción magnética alrededor de un alambre recto que lleva una corriente de electrones.

el alambre que lleva corriente, señalando el dedo pulgar la dirección de la corriente de electrones (de negativo a positivo), los demás dedos señalan la dirección de la inducción magnética. En algunos libros que usa la convención antigua de la corriente que va de positivo a negativo, emplean la regla de la mano derecha para que la inducción magnética resulte con la misma dirección que aquí se describe.

29.4 Propiedades magnéticas de un solenoide. Poco después de que Oersted anunció el descubrimiento del efecto magnético de un alambre que lleva corriente, encontró Ampère que una espira o una bobina de alambre actúan como un imán. En la

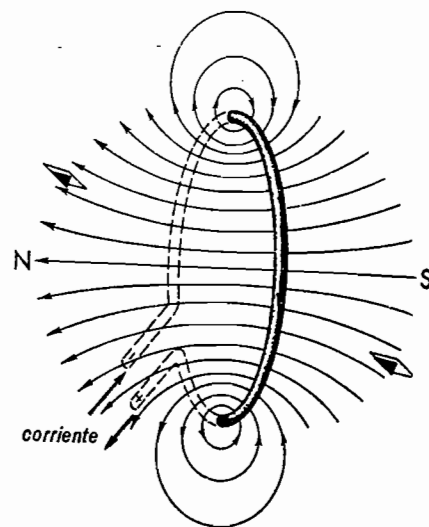


Fig. 29D. Inducción magnética por dentro y por fuera de una espira de alambre que lleva una corriente de electrones.

fig. 29D se ilustra esto con una sola espira de alambre y en la fig. 29E con una bobina de varias espiras (o vueltas) de alambre. Una bobina de alambre de esta clase es llamada a veces solenoide. En ambos casos, las líneas de inducción son tales que un extremo de la bobina actúa como polo magnético N y el otro extremo como polo magnético S.

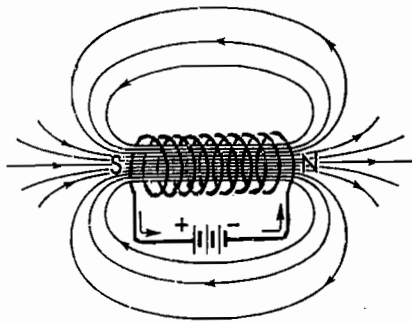


Fig. 29E. Campo magnético alrededor de un solenoide que lleva una corriente de electrones.

Por medio de la regla de la mano izquierda se puede predecir la dirección de la inducción magnética en todos los puntos que rodean a la bobina que lleva una corriente y se puede comprobar con una brújula. Dentro de cada espira o vuelta de alambre, las líneas señalan en una dirección, mientras que fuera de la misma tienen la dirección opuesta.

Fuera de la bobina, las líneas van de *N* a *S* en la misma forma que lo hacen en torno a un imán de barra permanente, mientras que dentro de la bobina van de *S* a *N*.

La bobina de alambre no sólo actúa como un imán, sino que se pueden usar dos bobinas para demostrar la repulsión y atracción de los polos iguales y contrarios.

Hay otra regla de la mano izquierda que no debe confundirse con la que se dio en la sección anterior, sino que se deriva de ella y es la siguiente: Si se sostiene un solenoide con los dedos alrededor de la bobina, señalando la dirección en que va la corriente de electrones, de $(-)$ a $(+)$, el dedo pulgar señala la dirección de las líneas internas de inducción y el polo *N*.

29.5 El electroimán. Cinco años después del descubrimiento de Oersted y de la demostración de Ampère de las propiedades magnéticas de un solenoide, William Sturgeon llenó el centro de una bobina de alambre con hierro dulce y así produjo un poderoso imán, como se ve en la fig. 29F.

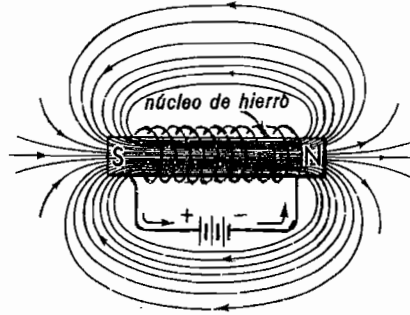


Fig. 29F. Un electroimán y la inducción magnética que lo rodea cuando fluye una corriente por la bobina.

La adición del núcleo de hierro mientras continúa fluyendo la corriente de electrones, produce un imán centenares de veces más potente que el solenoide. Una brújula cercana, puesta a oscilar lo demostrará, al vibrar rápidamente cuando está el núcleo de hierro en su lugar; y con lentitud cuando se saca éste.

Si se magnetiza por inducción una barra de hierro dulce, como en la fig. 28P, también ésta atraerá las limaduras de hierro con más fuerza si se pone el núcleo dentro del solenoide.

29.6 Efectos mecánicos de las corrientes eléctricas. Fue en la Navidad de 1821 cuando Michael Faraday descubrió que cuando se coloca un alambre que lleva corriente en el campo de un imán, se ejerce una fuerza mecánica sobre el alambre. Éste es el principio en que se basa el motor eléctrico moderno. En la fig. 29G se muestra una demostración del descubrimiento de Faraday, en la que se suspende de un soporte un alambre flexible de cobre de cerca de un metro de largo. Cerca del centro del alambre lo rodea un imán en forma de U.

Al cerrar el interruptor *K* fluye una corriente electrónica hacia arriba por el alambre y éste se mueve hacia la izquierda. Si se invierten las conexiones de la batería, invirtiendo con ello la dirección de la corriente, la desviación del alambre será hacia la derecha.

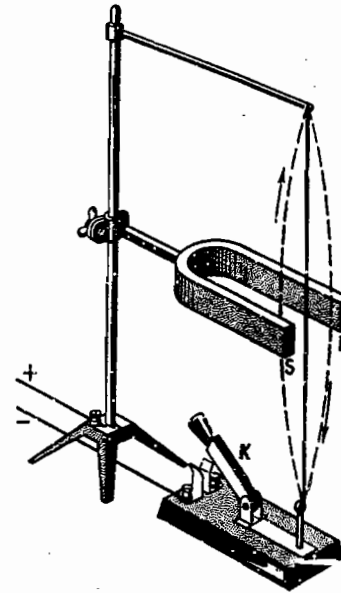


Fig. 29G. Demostración del efecto mecánico de una corriente eléctrica en un campo magnético.

Si se invierte el imán, con lo cual se intercambian los polos *N* y *S*, se vuelve a invertir la deflexión. En otras palabras, la inversión del campo magnético o de la dirección de la corriente de electrones invertirá la dirección de la fuerza que actúa sobre el alambre. La inversión de ambas a la vez, la hará permanecer la misma.

Para comprender algo de esta misteriosa fuerza invisible que actúa sobre el alambre que lleva corriente dentro del campo magnético obsérvense los diagramas de la figura 29H.

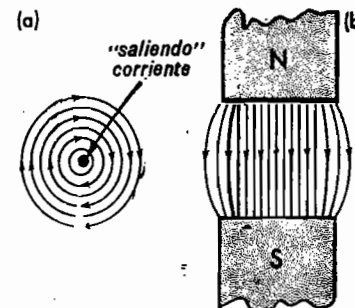


Fig. 29H. Campos magnéticos, (a) debido a una corriente de electrones y (b) debido a polos magnéticos.

Los círculos del diagrama (a) representan las líneas magnéticas circulares de fuerza alrededor de un alambre recto que lleva una corriente. La dirección de las flechas se obtiene por la regla de la mano izquierda y se presentan aquí con una corriente de electrones que salen de la hoja del libro.

Las líneas de fuerza del diagrama (b) representan el campo magnético que hay entre dos polos opuestos de un imán.

Si ahora colocamos el alambre con corriente entre los polos del imán, los dos campos actúan mutuamente, uno en el otro. La interacción es tal que se obtiene un nuevo campo de la forma que se ilustra en la fig. 29I (b). Imaginando que las li-

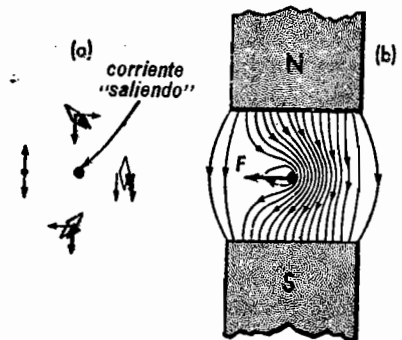


Fig. 29I. Diagrama de dos campos magnéticos actuando uno en el otro.

neas magnéticas de fuerza actúan como bandas de goma restiradas, se puede predecir por este diagrama que el alambre debe sufrir una fuerza, *F*, hacia la izquierda.

Para comprender cómo puede obtenerse este campo partiendo de la interacción de dos campos simétricos; debe recordarse que la dirección del campo en cualquier punto es la que toma allí un pequeño imán dipolar. Considérense, por ejemplo, los puntos *A*, *B*, *C* y *D* del diagrama (a). El campo debido a la corriente electrónica en el alambre es hacia la derecha en el punto *A* y el debido a los polos magnéticos es hacia abajo. Si los dos campos ejercen iguales momentos de torsión sobre una pequeña

brújula, ésta señalará en una dirección intermedia entre ellos.

En *B*, el campo debido al alambre es hacia abajo, lo mismo que el del imán. Una brújula en este punto señalaría hacia abajo. En *C*, los campos vuelven a estar en ángulo recto y la brújula señala hacia abajo y a la izquierda. En *D*, los campos son opuestos y, si tienen magnitud igual, anularán mutuamente sus efectos. La repetición de este proceso en muchos otros puntos llevará al campo presentado en el diagrama (b).

Es importante notar que la dirección de la corriente electrónica *I* en el alambre, la dirección del campo magnético *B* en el alambre debido al imán, y la dirección de la fuerza *F* que actúa sobre el alambre, son todas perpendiculares entre sí. Más aún, la dirección de la fuerza *F* puede determinarse rápidamente aplicando la regla de la mano izquierda a la corriente de electrones por el alambre. Si se toma el alambre con la mano izquierda con el dedo pulgar señalando en la dirección de la corriente de electrones (de $-$ a $+$), la fuerza es hacia el lado débil del campo, es decir, hacia la región donde los dedos se dirigen contra el campo del imán.

Debe subrayarse aquí que esta fuerza se ejerce realmente sobre los electrones, las cargas en movimiento en el alambre, y que por estar éstos confinados dentro del alambre, hacen que éste se mueva. Un electrón en reposo en un campo magnético no sufre ninguna fuerza por parte del imán. Un electrón que se mueve a través de las líneas magnéticas de fuerza sufre una fuerza en ángulo recto con el campo y con la dirección del movimiento.

Las cargas positivas de los núcleos de los átomos del alambre soportan también una fuerza y esta fuerza está dirigida al contrario que la que experimentan los electrones. Puesto que sólo los electrones están en libertad de moverse, el flujo de la corriente por el alambre está formado sólo de electrones.

29.7 El motor eléctrico. Un motor es un aparato en el cual la energía eléctrica que recibe en forma de corriente eléctrica se transforma en energía mecánica. En la figura 29J se indica el fundamento del mo-

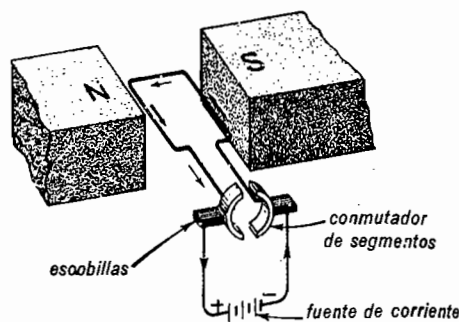


Fig. 29J. Elementos principales para demostrar los principios de un motor eléctrico

tor. Un alambre que lleva una corriente de electrones está doblado en forma de espira rectangular colocada entre dos polos magnéticos, como se ve en el diagrama. Colocando ésta en posición horizontal, el campo magnético resultante es alterado como se ve en la fig. 29K, y empuja a un alambre hacia abajo y al otro hacia arriba.

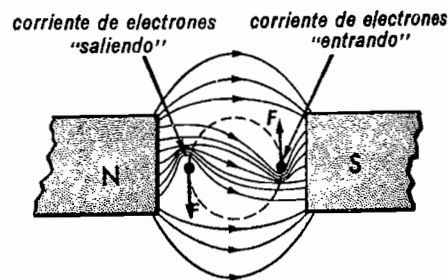


Fig. 29K. Diagrama del campo magnético en torno de una espira de alambre que lleva corriente como se halla en un motor eléctrico.

Si la espira está en libertad de girar en torno a un eje, la espira se colocará según un plano vertical. En este punto, la corriente de la espira puede invertir su dirección mediante los contactos deslizantes y el con-

mutador de segmentos representados en la figura. La inversión de la corriente de electrones invierte la fuerza *D* de manera que el lado de la espira que antes era empujado hacia arriba, ahora lo es hacia abajo, y el lado que antes era empujado hacia abajo, lo es ahora hacia arriba. Por lo tanto, la espira gira otra media vuelta hasta que vuelve a invertirse la corriente.

Por la repetición del proceso de inversión de la corriente a cada media vuelta, se obtiene una rotación continua moviéndose el lado izquierdo de la espira hacia abajo, y el lado derecho siempre hacia arriba.

29.8 Corrientes eléctricas inducidas. El descubrimiento de las corrientes eléctricas inducidas, se remonta a más de 100 años atrás, hasta 1831 en que Michael Faraday * realizó unos experimentos muy bien planeados. Encontró que se produce una co-

* Michael Faraday (1791-1867), físico experimental inglés. Hijo de un herrero, en su niñez se ganó el sustento como aprendiz de encuadernador. Faraday se interesó mucho en la ciencia, usando parte de su tiempo en leer algunos de los libros que pasaban por sus manos. Con un deseo apasionado de dedicar su vida a la ciencia, le llegó por fin su oportunidad cuando se convirtió en el ayudante del gran científico inglés sir Humphry Davy, del Instituto Real. Siendo joven, proclamó abiertamente que las mujeres nada tenían que hacer en su vida, y llegó a escribir y publicar un poema criticando el amor. A la edad de veintinueve años vio a Sarah Bernhard, se enamoró perdidamente y se casó con ella. Sarah fue su compañera devota e inspiradora durante los 50 años restantes de su vida. Cuatro meses después de casarse, hizo el famoso descubrimiento del movimiento de un alambre que lleva corriente en medio de un campo magnético. Ya que un alambre que lleva corriente se mueve por medio de un campo magnético, ¿no debería ser cierto lo inverso y hacer que un imán produjera corriente en un alambre? Experimentó con imanes y bobinas de alambre durante muchos días, hasta que, ya desesperanzado, introdujo un imán dentro de una bobina y observó que en ésta se generaba corriente. ¿Por qué no lo había descubierto antes? El problema estaba en el movimiento; era el eslabón faltante que él no había tenido en cuenta. Por este descubrimiento recibió honores de todo el mundo científico. Tantas universidades le concedieron grados honoríficos, que pronto tuvo que rechazar estos honores. Rehusó la presidencia de la Institución Real y de la Sociedad Real de Londres, y tampoco quiso ser armado caballero. Como todos los grandes científicos, estimaba más su trabajo que los honores.

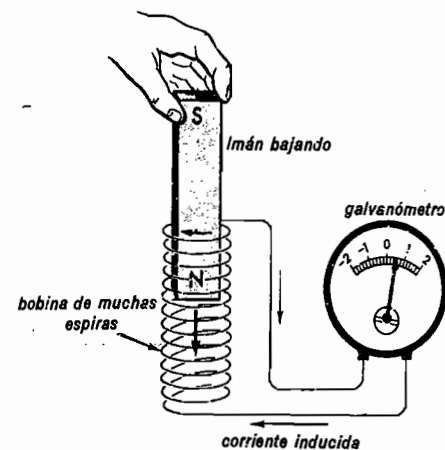


Fig. 29L. Descubrimiento experimental de Faraday de las corrientes inducidas de electrones.

rriente eléctrica cuando se introduce una barra imanada recta dentro de una bobina de alambre. En la fig. 29L se ilustra este experimento. Conforme se introduce dentro de la bobina el polo *N* del imán, la aguja del galvanómetro se desvía hacia la *derecha*; cuando se le saca, la aguja se desvía hacia la *izquierda*, indicando una corriente de dirección opuesta. Si introduce el imán con el polo *S*, hacia abajo, la aguja se desvía hacia la *izquierda* y cuando se le saca, la desviación es hacia la *derecha*.

Lo que produce la corriente es el movimiento relativo de la bobina y del imán, y no importa si se mueve la bobina, el imán o ambos. En cualquier caso, la corriente se detiene cuando cesa el movimiento relativo. Una forma algo anticuada de expresar esto es diciendo que hay una fuerza electromotriz inducida sólo cuando el alambre corta a las líneas magnéticas de inducción se produce una fem. Una expresión algo más aceptable en la actualidad es que sólo cuando cambia el flujo total que abarca a un circuito eléctrico cerrado se induce en éste una fem. Para demostrar este concepto, se puede realizar un experimento simple como el que se ilustra en la fig. 29M.

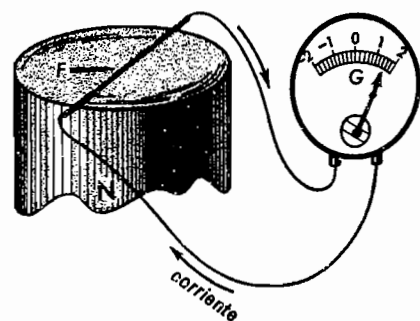


Fig. 29M. Montaje experimental para demostrar la inducción de corrientes.

A un alambre flexible conectado a un amperímetro y sostenido en las manos, se le hace mover en varias formas frente al polo de un imán. Cuando es sostenida una sección recta del alambre sobre el polo *N* y se mueve hacia la derecha, fluye una corriente de electrones en la dirección señalada por las flechas. Si se mueve el alambre en la dirección contraria, la fem y la corriente inducidas invierten su dirección. Si se mueve el alambre verticalmente hacia arriba o abajo, paralelo a la inducción magnética, no fluye corriente. En otras palabras: *habría una fem inducida sólo cuando varía el número total de líneas de inducción que pasan por el circuito cerrado.*

Se puede usar la regla de la mano izquierda para predecir la dirección de la fem inducida en cualquier sección de alambre. Si imaginamos que tomamos el alambre con la mano izquierda, mientras que se mueve a través del campo magnético, con los dedos señalando la dirección que tiene la inducción inmediatamente por delante de él, el pulgar señalará en la dirección de la fem inducida.

El hecho de que sea producida una corriente electrónica significa que se ha creado energía eléctrica, la que se ha creado a costa de trabajo mecánico, pues al mover el alambre a través del campo, se ha tenido que ejercer una fuerza, *F*, a lo largo de una distancia *d*. Mientras más rápidamente se mueva el alambre y mayor sea el campo del imán, mayor será la fuerza necesaria y mayor será la corriente electrónica y la

fuerza electromotriz inducidas. Si se detiene el movimiento del alambre en medio del campo, cesará la corriente de electrones. Estos son los principios esenciales del generador eléctrico.

La regla de la mano izquierda puede usarse para predecir la dirección de la corriente de electrones inducida. Conforme se mueve el alambre por el polo del imán, como se ve en la fig. 29M, las líneas magnéticas imaginarias de inducción, actúan como si fueran tiras de goma estiradas, y que son alteradas por la acción de la fuerza *F* y desviadas como se ve en la figura 29I(b). Si ahora imaginamos que se toma el alambre, con los dedos señalando en la dirección que tienen las líneas de inducción en el lado del alambre donde el campo es fuerte, es decir, donde se amontonan las líneas, el dedo indicará la dirección de la corriente de electrones inducida.

29.9 El generador eléctrico. Un generador eléctrico se construye igual que un motor eléctrico, con una armadura giratoria que contiene bobinas de alambre, unas piezas polares, embobinados de campo, escobillas y conmutador. En vez de darle una corriente de electrones para obtener rotación mecánica, se usa trabajo mecánico para hacer girar la armadura, y se produce una corriente eléctrica.

Si en la construcción de un generador se usan dos anillos completos, en vez del conmutador, como se ve en la fig. 29N,

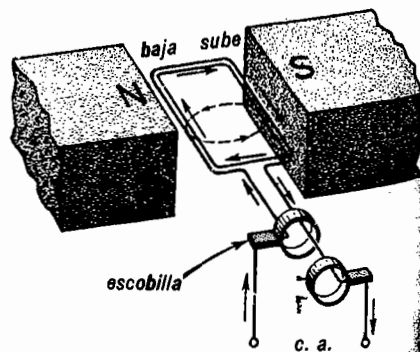


Fig. 29N. Fundamento del generador eléctrico.

la corriente que va a salir por las escobillas fluye primero en una dirección y luego en la otra. La inversión de la corriente con cada media rotación de la armadura, se debe al hecho de que cada alambre se mueve dentro del campo, en un instante hacia arriba, y en el siguiente hacia abajo. En un momento, una terminal es positiva y la otra negativa; en el siguiente, la primera es negativa y la segunda positiva. Esta fuerza electromotriz que periódicamente se invierte, es llamada *fem alterna*.

Si se desea obtener una corriente continua, debe usarse un conmutador con su anillo seccionado, como se ilustra en la figura 29O. Puede verse con este sistema que

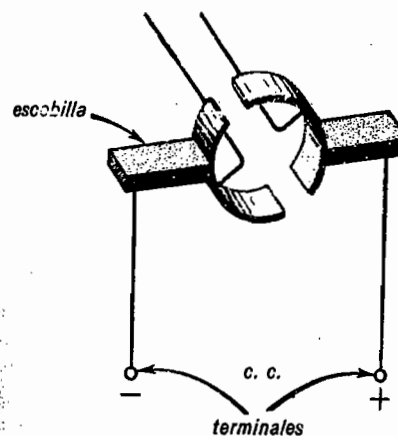


Fig. 29O. Conmutador de segmentos para un generador de corriente continua.

una escobilla está todo el tiempo en contacto con aquellos alambres que, al pasar por el campo, se mueven hacia arriba, mientras que la otra está en contacto con los alambres que se mueven hacia abajo. Esto produce una corriente de electrones en una dirección y toda la máquina se llama *generador de corriente continua* (c.c.).

Es importante notar que un generador no produce electricidad. La electricidad, o las cargas eléctricas, están siempre en el alambre, y el generador sólo las pone en movimiento. El generador produce corriente eléctrica.

29.10 Corrientes alternas. La diferencia entre una corriente continua y otra alterna, es que la continua fluye siempre en una dirección, mientras que la alterna invierte su dirección periódicamente. Para mandar una corriente continua a través de un circuito eléctrico se necesita una fuente capaz de producir una fuerza electromotriz constante. Para este fin se usa una batería o un generador de corriente continua.

Para mandar una corriente alterna por un circuito, por otra parte, se requiere una fuente capaz de invertir su *fem*. Para hacer esto se usa generalmente un generador de corriente alterna.

En la fig. 29P se da una representación gráfica de una fem alterna.

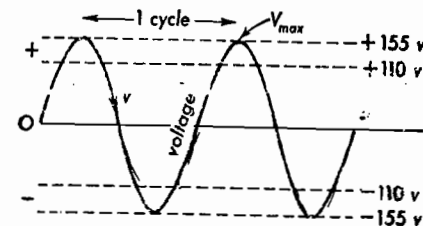


Fig. 29P. Gráfica del voltaje de la bobina de un generador de corriente alterna.

Los generadores de la mayoría de las plantas de energía invierten varias veces su fem en el breve tiempo de un segundo. La energía surtida a viviendas y edificios públicos, en casi todas las ciudades, viene en forma de corriente alterna de 25, 50 o 60 ciclos por segundo y 110 o 220 voltios.

Una fem alterna de 60 ciclos y 110 voltios, por ejemplo, es aquella en que la diferencia de potencial invierte su dirección 120 veces cada segundo. La valuación de 110 voltios, como se ve en la fig. 29P, especifica un tipo de promedio del voltaje, llamada *fem media cuadrática* y no el llamado *voltaje máximo* de 155 voltios.

El voltaje máximo se obtiene cuando el plano de la bobina está paralelo al campo y el cero resulta cuando está perpendicular.

$$V_{\text{máx}} = NBA\omega \quad (29d)$$

donde N es el número de vueltas de la bobina, B es la inducción magnética en webers/metro², A es el área de la bobina en metros², ω es la velocidad angular en radianes segundo.

Si se usa f para representar la frecuencia de rotación

$$\omega = 2\pi f \quad (29e)$$

El voltaje medio cuadrático está dado por

$$V_e = 0.707 V_{\text{máx}} \quad (29f)$$

29.11 Ley de Lenz. Cuando se mueve un conductor a través de un campo magnético, la corriente electrónica inducida en el alambre es de tal dirección que el propio campo magnético generado por la corriente actúa sobre el campo magnético inductor de modo que se opone al movimiento. Esto se conoce como la Ley de Lenz, por haberlo establecido H. Lenz por primera vez en 1833. La acción de los dos campos magnéticos, uno sobre el otro, es siempre oponerse al movimiento o a cualquier cambio en las condiciones ya existentes, puesto que si ayudaran al cambio, tendríamos un movimiento perpetuo y una violación de la ley de la conservación de la energía.

Si el polo N de una barra imán recta se introduce a un solenoide, como se ve en la fig. 29L, la corriente electrónica inducida en la bobina es de tal dirección que produce un polo N cerca de la parte alta de la bobina. Por esto se rechazan los dos polos N tendiendo a detener el movimiento. Para mantener la corriente de electrones debe ejercerse continuamente una fuerza, F , sobre el imán móvil. Esta fuerza F , moviéndose a lo largo de una cierta distancia, es la que determina la cantidad de trabajo mecánico hecho para producir cierta corriente.

Si ahora se retira el polo N del solenoide, la corriente electrónica inducida en la bobina invierte su dirección y produce un

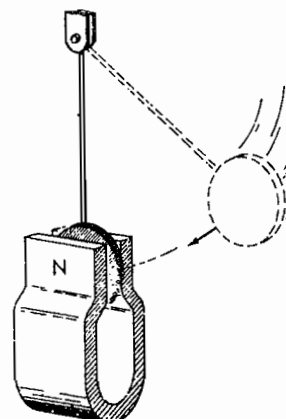


Fig. 29Q. Las corrientes inducidas en un péndulo de cobre de forma de disco detienen pronto su oscilación entre los polos.

polo S en la parte alta de la bobina. Los polos contrarios se atraen entre sí tendiendo a detener el movimiento. Nuevamente se debe ejercer continuamente una fuerza F para mantener la corriente fluyendo y, por tanto, se realiza para ello un trabajo.

Hay muchos modos de demostrar la ley de Lenz. Un experimento común consiste en mover rápidamente una placa plana de cobre o aluminio a través de un campo magnético fuerte, como se ve en la fig. 29Q. Conforme entra cada parte de la placa en el campo entre los polos del imán, una intensa fuerza tiende a detenerla. Lo que ocurre eléctricamente es que se producen en el metal fuertes corrientes parásitas de electrones. El campo magnético resultante de estas co-

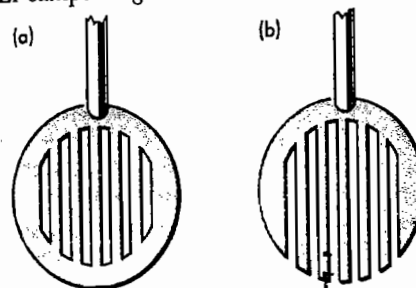


Fig. 29R. Discos ranurados de cobre para demostrar las corrientes inducidas de Eddy.

rrientes se opone al campo a través del cual se está moviendo. Si se sostiene la placa en la mano da la sensación de que se mueve entre melaza.

Si se reemplaza el disco entero por un disco ranurado, como el de la fig. 29R(a), se inducen fuertes corrientes en la barras verticales al entrar al campo y se detiene

rápidamente el disco. Si las ranuras están abiertas por un extremo, como en el diagrama (b), cada barra resulta un circuito abierto y no pueden producirse fuertes corrientes. En consecuencia, el disco no es frenado fuertemente, sino que oscila con bastante libertad a través del campo magnético.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuáles son los cinco efectos de las corrientes eléctricas? ¿Cuál es, en particular, el efecto térmico?

2. Una misma cantidad de energía eléctrica, ¿produce siempre la misma cantidad de calor? ¿Cuál es la Ley de Joule?

3. ¿Cuáles son los tres factores que determinan la energía eléctrica convertida en calor? ¿Cuáles son las unidades de energía calorífica? ¿Cuáles son las unidades de energía eléctrica?

4. Si se reemplaza V de la ec. (29c) por el valor IR de la Ley de Ohm, ¿cómo quedará la ecuación? Si se reemplaza I por V/R , ¿cómo quedará la ecuación?

5. ¿Quién descubrió el efecto magnético de una corriente electrónica? ¿Qué fue lo que hizo de él? ¿Qué ocurre cuando se invierte la corriente?

6. ¿A qué clase de corriente se le aplica la ley de la mano izquierda? ¿Cómo se aplica esta regla a un alambre recto?

7. ¿Cómo se aplica la ley de la mano izquierda a una bobina de alambre?

8. ¿Qué efecto produce un núcleo de hierro dulce sobre la intensidad del campo magnético que rodea a un solenoide? ¿Necesita fluir una corriente para producir el campo?

9. ¿Quién descubrió el efecto mecánico de las corrientes eléctricas? ¿Cuáles son las condiciones necesarias para producir el efecto mecánico de una corriente eléctrica?

10. ¿Cómo se usa el efecto mecánico en un motor eléctrico? ¿Para qué se usa el anillo segmentado? ¿Por qué se usan contactos deslizantes?

11. ¿Quién descubrió las corrientes electrónicas inducidas? ¿Cómo se produjo este fenómeno?

12. ¿Puede inducirse una corriente en un alambre estacionario? ¿Puede inducirse una corriente en un alambre mediante un campo magnético estacionario?

13. Si se mueve un alambre a través de un campo magnético paralelo a las líneas de inducción, ¿se desarrollará alguna fem en el alambre?

14. ¿Cómo puede inducirse una corriente alterna en un alambre?

15. ¿Cómo se producen generalmente las corrientes alternas?

16. ¿Cuáles son los cuatro factores de que depende la fem producida por un generador de corriente alterna?

17. ¿Cuál es la Ley de Lenz? ¿Cómo puede demostrarse?

18. El elemento calentador de un calentador eléctrico toma una corriente de 10 amperios cuando se conecta a 110 voltios. ¿Cuántas calorías se producen en una hora?

19. Un tostador eléctrico toma una corriente de 4 amp cuando se conecta a un circuito de alumbrado doméstico de 120 voltios. ¿Cuántas calorías se producen en un minuto? (Resp. 6 910 cal.)

20. Se conecta una plancha eléctrica que tiene una resistencia de 15 ohmios a un contacto de 110 voltios. Encontrar el calor producido en 5 min.

21. Calcular el calor desarrollado por un soldador eléctrico en 10 min, si toma 3.5 amperios de una línea de 120 voltios. (Resp. 60 500 cal.)

22. Un tostador eléctrico con una resistencia de 25 ohmios toma una corriente de 5 amp cuando es conectado a un circuito de alumbrado doméstico. Si necesita 2 min para tostar una rebanada de pan, ¿cuántas calorías se necesitaron?

23. El elemento calentador de una estufa conectada a una línea de 220 voltios toma una corriente de 5 amp. Encontrar la cantidad de calor producida en 10 min. (Resp. 158 000 cal.)

24. Una parrilla eléctrica toma una corriente de 7.5 amp. cuando se conecta a un circuito doméstico de 115 voltios. Encontrar el calor producido en 10 min.

25. Un tostador toma una corriente de 5 amp cuando se conecta a un circuito doméstico de 110 voltios. ¿Cuánto calor se producirá en 5 min? (Resp. 39 600 cal.)

26. Una cafetera eléctrica toma una corriente de 8 amp al conectarla a un circuito doméstico de 110 voltios. ¿Cuánto tardará en elevar la temperatura de 1 kg de agua de 0° C a la temperatura de ebullición normal? Suponga que no hay pérdidas de calor.

27. Una tetera que contiene 1 galón de agua (3 785 cm³) a la temperatura de 10° C se pone a calentar sobre una parrilla eléctrica. Si el elemento calentador toma una corriente de 8 amp de una línea de 220 voltios, y la mitad del calor producido se aprovecha por el agua, ¿cuánto tardará en llegar el agua a su punto de ebullición? (Resp. 26 min, 53 seg.)

28. Una cafetera eléctrica conteniendo 1 000 cm³ de agua a 15° C se conecta a una línea de 110 voltios. Si la corriente electrónica tomada es de 4.5 amp y el 65% del calor desarrollado es recibido por el agua, ¿a qué temperatura estará el agua en 8 min?

29. Tres resistencias de 5, 8 y 12 ohmios respectivamente, son conectadas en serie a una batería. Si se introducen estas resistencias en un vaso que contiene 500 cm³ de agua y pasa por ellos una corriente de 5 amperios, ¿cuánto tardará en elevarse su temperatura desde 25 a 100° C? (Resp. 4 min, 10 seg.)

30. Se hace girar una bobina plana rectangular de 10 cm por 20 cm y 50 espiras de alambre con una rapidez constante de 3 000 rev/min en un campo magnético donde la inducción magnética es de 0.2 webers/m². Calcular: a) el voltaje máximo, y b) el voltaje medio cuadrático.

31. Una bobina plana circular, de 20 cm de diámetro y con 100 vueltas de alambre, se hace girar a 2 400 rev/min en un campo magnético donde $B = 0.25$ webers/m². Encontrar: a) la fem máxima producida, y b) el voltaje medio cuadrático. (Resp. a) 197 voltios; b) 140 voltios.)

32. Una bobina rectangular de 100 vueltas tiene 10 cm de ancho y 20 cm de largo. ¿Cuál es la rapidez con que debe girar en el campo magnético de la Tierra ($B = 5 \times 10^{-4}$ w/m²) para producir una fem máxima de 0.10 voltios.

33. Una bobina plana circular de 50 vueltas tiene 20 cms de diámetro. Si esta bobina se hace girar en un campo magnético uniforme para que produzca un voltaje medio cuadrático de 100 voltios a 1 000 ciclos/seg, ¿cuál debe ser el valor de la inducción magnética? (Resp. 1.43×10^{-2} w/m².)

34. Un aparato eléctrico con una resistencia de 30 ohmios está conectado a un contacto doméstico de 120 voltios c.a. Encontrar: a) el voltaje máximo, y b) la corriente máxima.

30

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS ELECTRONES

El estudio de las descargas eléctricas a través de los gases y el descubrimiento de los átomos y los electrones, marcan históricamente el principio de una nueva rama de la física, llamada *física moderna*. La física moderna, que estudia principalmente los átomos, las moléculas y la estructura de la materia, se ha desarrollado a un ritmo tan rápido en los últimos años, que ahora es el centro de atención de muchos científicos eminentes de todo el mundo. No exageramos al decir que los descubrimientos recientes de la física atómica han tenido y seguirán teniendo una influencia enorme en el desarrollo de la civilización. Debido a que el tema de la física atómica es relativamente nuevo, es lógico tratar en un orden más o menos cronológico el material asociado con cada descubrimiento importante.

Aunque nadie ha visto un átomo, no queda duda en la mente de los científicos de que estas partículas existen realmente. Para los físicos y químicos que han construido y establecido las teorías actuales de la estructura de la materia, los átomos son tan reales como cualquier objeto material suficientemente grande para ser visto con los ojos o tocado con las manos. Su realidad es confirmada por cientos de experimentos que pueden planearse y ejecutarse en los laboratorios de investigación.

Al ir desarrollando en este capítulo el tema de la física atómica, resultará cada vez más evidente que, aunque un físico necesite una gran imaginación, el conocimiento acumulado acerca de los átomos, su estructura y su comportamiento bajo una

multitud de condiciones, se basan en los resultados exactos de experimentos efectuados con gran cuidado y precisión.

30.1 Descarga eléctrica a través de un gas. En 1853 un oscuro científico francés, de nombre Massón, mandó la primera chispa eléctrica de una bobina de inducción de alta tensión a través de un recipiente de vidrio donde se había hecho parcialmente el vacío, y descubrió que en lugar de la chispa típica que se observaba en el aire, el tubo se llenaba con un resplandor brillante. Varios años más tarde, Heinrich Geissler, un soplador de vidrio alemán, en Tübingen, inició y desarrolló la fabricación de tubos de descargas con gases. Estos tubos de vidrio, fabricados de distintos tamaños, formas y colores y parecidos a los modernos usados en la publicidad, atrajeron la atención de los físicos en las principales instituciones científicas y universidades del mundo, que compraron muchos de estos *tubos de Geissler* y los usaron para estudios y demostraciones durante las clases.

En 1869 W. Hittorf de Munster, usando mejores bombas de vacío, observó cerca de uno de los electrodos de la descarga eléctrica una región oscura que crecía en tamaño conforme continuaba haciéndose el vacío. Ésta es sólo una de las fases del estudio de las descargas eléctricas a través de gases, estudiadas y observadas unos pocos años más tarde por sir William Crookes.*

* Sir William Crookes (1832-1919), físico y químico inglés. A los 22 años ingresó como asistente al Observatorio Radcliff, de Oxford. Lo armaron caballero en 1897, recibió la Orden del Mérito en

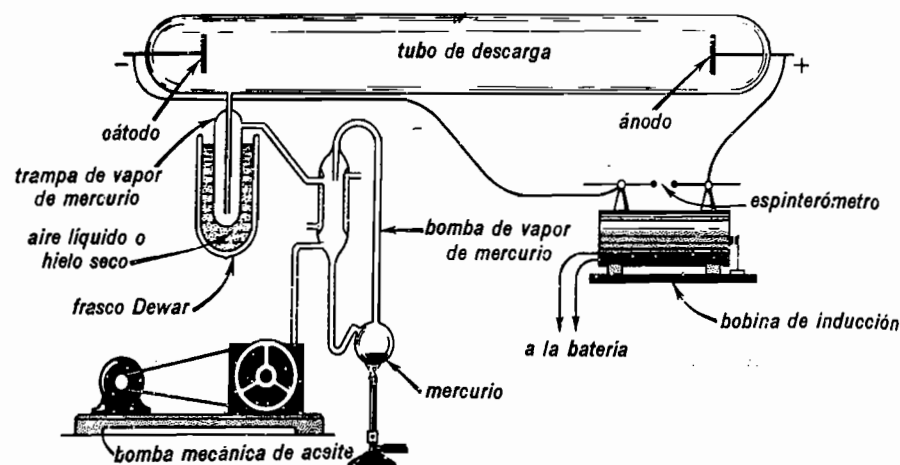


Fig. 30A. Tubo de descarga con sus conexiones eléctricas y la bomba de vacío con sus accesorios.

En la fig. 30A se ve un tubo largo de vidrio, de unos 4 cm de diámetro y 150 cm de largo, conectado a una bomba de difusión de mercurio, y una bomba mecánica de vacío. El propósito de utilizar las bombas es permitir que se observen continuamente los cambios de la descarga eléctrica conforme se va extrayendo lentamente el aire del tubo. El objeto de la *trampa* es congelar los vapores de mercurio y evitar que lleguen al lugar de la descarga. Se ve conectada la corriente de alto voltaje de una bobina de inducción a los dos electrodos del tubo, uno en cada extremo.

Aunque la bobina de inducción no produce corriente continua, sus características son tales que el potencial es más alto en un sentido de su circulación y menos elevado en el sentido opuesto, y por ello los dos electrodos se comportan casi como si se usara una corriente continua de alta tensión. El electrodo negativo se llama *cátodo* en este caso, y el electrodo positivo *ánodo*.

Cuando el aire del tubo es evacuado lentamente, se produce la primera descarga

1910 y fue presidente de la Sociedad Real de 1913 a 1915. Inventó y construyó el primer tipo de tubo de rayos X enfocados. Sus experimentos con las descargas eléctricas a través de gases enrarecidos, lo llevó al descubrimiento del espacio oscuro que ahora lleva su nombre.

bajo una fuerza electromotriz de 10 000 a 15 000 voltios, cuando la presión baje a un centésimo de atmósfera, es decir, a una presión barométrica de unos 10 mm de mercurio. Esta primera descarga, que se ilustra en (a) de la fig. 30B, está formada por cintas (líneas) largas, y azuladas. Conforme disminuye la presión del gas a unos 5 mm de mercurio (llamado a veces vacío de tubo de Geissler), la descarga se vuelve color rosa y al mismo tiempo se ensancha hasta que llena todo el tubo, como se indica en (b). A una presión todavía más

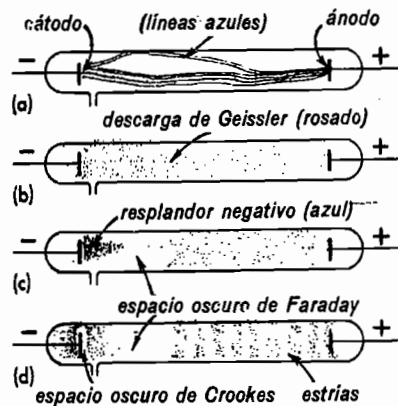


Fig. 30B. Aspecto de la descarga eléctrica de alto voltaje a través del aire enrarecido progresivamente.

baja de unos 2 mm, aparece una región oscura llamada *espacio oscuro de Faraday* en la región del cátodo, dividiendo la descarga brillante en dos partes, una sección larga rosada que se llama la *columna positiva* y una sección azulada corta, llamada *resplandor negativo*. Cuando la presión baja más aún, el espacio de Faraday aumenta de tamaño y el resplandor negativo se aleja del cátodo, produciendo entre estas últimas otro espacio oscuro. Con la aparición de esta segunda región oscura, llamada *espacio oscuro de Crookes*, la columna positiva se divide en una serie de capas a intervalos uniformes llamadas *estrias*.

Si se continúa el bombeo, las estrias y el resplandor negativo se vuelven más tenues, y el espacio oscuro de Crookes se ensancha hasta que, finalmente, a una presión cerca de 0.01 mm, llena todo el tubo. Entonces aparece un nuevo rasgo distintivo: todo el tubo de vidrio brilla con una luz tenue verdosa.

30.2 Rayos catódicos. El resplandor verde de la etapa final de la descarga gaseosa que acabamos de describir, resultó ser debido a una *fluorescencia del vidrio producida por rayos invisibles que emanan del cátodo*. Estos rayos catódicos, como son llamados, que sir William Crookes creía eran un *estado ultragaseoso*, y Johann W. Hittorf pensó que eran un *cuarto estado* de la materia, resultaron ser un conjunto de pequeños corpúsculos que ahora denominamos electrones. En el espacio relativamente libre de un tubo de elevado vacío, las partículas desprendidas de los átomos, rara vez entran en colisión con las moléculas del gas, y se mueven a lo largo del tubo hasta que chocan en las paredes de vidrio.

El primer descubrimiento importante relativo a la naturaleza de los rayos catódicos es que avanzan en línea recta. Fue revelado por primera vez por Hittorf en 1869 proyectando las sombras de objetos colocados dentro del tubo de descarga. Esto se demuestra generalmente con el tubo de diseño especial que se ve en la fig. 30C.

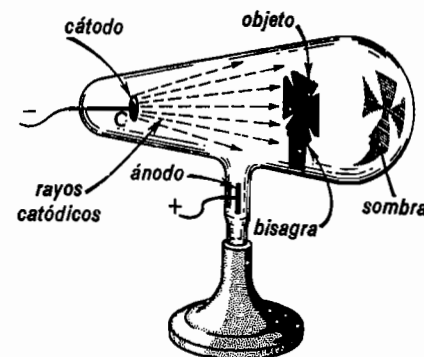


Fig. 30C. Tubo de Crookes para demostrar que los rayos catódicos avanzan en línea recta.

Donde los rayos chocan en las paredes del tubo, éste produce una fluorescencia verde, mientras que en la sombra se mantiene oscuro. Bajo el continuo bombardeo de las paredes por los rayos catódicos, la fluorescencia se va atenuando debido al efecto de fatiga que sufre el vidrio. Esto se demuestra inclinando el objeto mediante su bisagra y permitiendo que los rayos choquen en la superficie de vidrio no fatigada. Donde antes aparecía la sombra, ahora será claramente visible una imagen verde del objeto.

Crookes demostró en 1870 que los rayos catódicos tienen gran cantidad de movimiento y energía, usando el tubo de diseño especial que se ilustra en la fig. 30D. Los rayos que parten del cátodo adquieren una

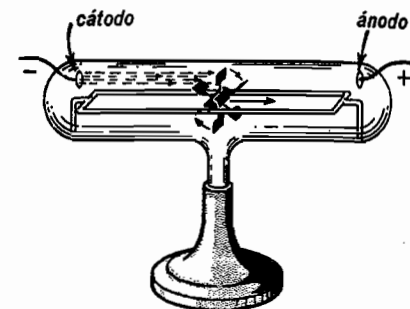


Fig. 30D. Los rayos catódicos tienen una cantidad de movimiento grande y energía. Los rayos catódicos que chocan en las aspas del pequeño rehilete lo hacen rodar a lo largo del tubo.

gran velocidad al ir hacia el ánodo, chocan en las aspas de mica de una pequeña rueda de aletas y ejercen una fuerza, haciendo que gire y que ruede a lo largo de una doble vía hacia el ánodo. Si se invierte el potencial haciendo que el electrodo de la derecha sea el cátodo cuando llega al final de la vía, se hará que regrese rodando hacia el ánodo que ahora estará a la izquierda. Crookes dedujo de este experimento la conclusión de que las partículas del cátodo tenían una *cantidad de movimiento grande* y que, por lo tanto, tenían *masa, velocidad y energía cinética* $1/2 mv^2$.

En 1895 Jean Perrin descubrió en París que los rayos catódicos son partículas con carga negativa. En la fig. 30E se ve el

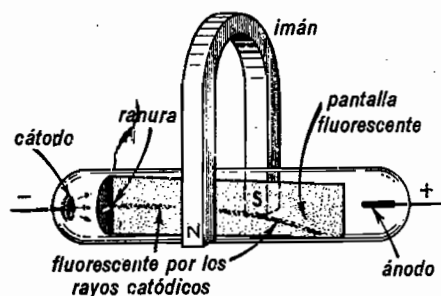


Fig. 30E. La flexión de un haz de rayos catódicos por el campo de un imán demuestra que los rayos catódicos son partículas con carga negativa.

tubo de descarga de construcción especial usado generalmente para demostrar esta propiedad por medio de una ranura estrecha se limita un haz de rayos catódicos a un haz delgado como una cinta de rayos. El camino seguido por los rayos se hace visible, permitiendo que choquen en una tira larga de metal, cubierta con pintura fluorescente de sulfuro de cinc. Colocando un imán de herradura sobre el exterior del tubo, como se indica, la trayectoria de los rayos catódicos se desvía hacia abajo. Si se invierte la polaridad del imán, la trayectoria se desvía hacia arriba. La flexión demuestra que están cargados, y la dirección de la misma indica el signo

de la carga. Estando cargados, la corriente de partículas es como una corriente de electrones. Aplicando la regla de la mano izquierda, con la dirección de la inducción magnética y la dirección de la corriente (ver la Sección 29.3), se encuentra que la carga es negativa. (Recuérdese que la regla de la mano izquierda se aplica a la corriente de electrones que va del polo negativo al positivo.)

La potencia de penetración de los rayos catódicos fue demostrada por Heinrich Hertz y su ayudante, P. Lenard, pasando los rayos catódicos a través de láminas delgadas de aluminio. Se encontró que los rayos conservaban suficiente poder para producir fluorescencia y fosforescencia después de atravesarlas.

30.3 Experimento de Millikan de la gota de aceite. Millikan * empezó sus experimentos sobre la carga del electrón en 1906. En la fig. 30F se representa un diagrama simplificado de su aparato. Las gotas diminutas de aceite procedentes de un pulverizador, son rociadas en la región que está encima de una de las dos placas metálicas circulares E^+ y E^- . Vista en sección transversal, la placa superior está perforada con un pequeño agujero, P , a través del cual ocasionalmente cae una de las gotas de aceite. Una vez que está entre las placas, esta gota es iluminada por una lámpara de arco lateral y se observa mediante un microscopio de poco aumento.

* Robert Andrews Millikan (1868-1953), físico norteamericano, educado en el Colegio Oberlin y en la Universidad de Columbia, profesor de física durante 25 años en la Universidad de Chicago y presidente del Laboratorio Norman Bridge del Instituto Tecnológico de California en Pasadena, durante 30 años. Sirvió durante la Primera Guerra Mundial en la división de investigación del Cuerpo de Señales, con grado de teniente coronel. Sus contribuciones principales a la ciencia han sido su medida de la carga del electrón, su determinación fotoeléctrica de la energía de un cuanto de luz, y su estudio preciso de los rayos cósmicos. Fue el segundo norteamericano que ganó el Premio Nobel de Física (1923). También recibió la medalla Edison, la Medalla Hughes de la Real Sociedad, la Medalla Faraday y la Medalla Mattenci.

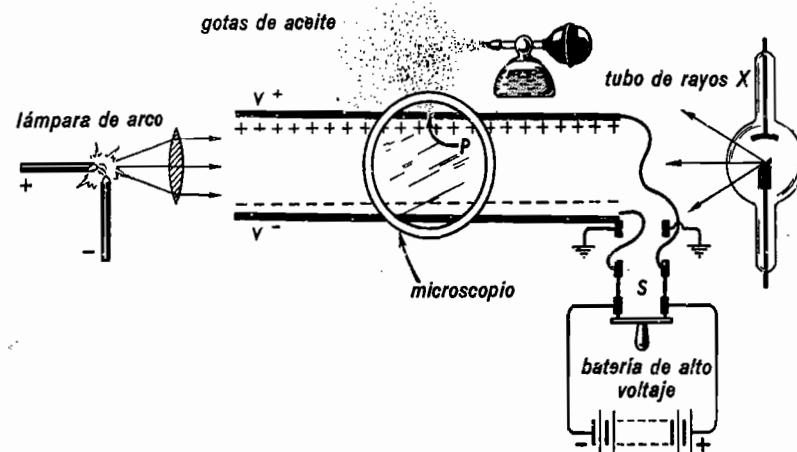


Fig. 30F. Experimento de Millikan con gotas de aceite para determinar la carga del electrón.

Con el interruptor S en la posición de *sube*, las placas del condensador están conectadas a tierra de manera que no tengan carga. En estas condiciones, la gota de aceite que cae por la atracción de la gravedad, tiene una velocidad constante. Esta *velocidad terminal*, como se le llama, es alcanzada por la gota antes de entrar al campo visual y es de un valor tal que la acción hacia abajo de la gravedad, F_g , de la fig. 30H(a), es contrarrestada exactamente por la fuerza de resistencia del aire hacia arriba. Midiendo esta velocidad de caída, se puede calcular la fuerza F_g y de ella determinar la masa de la gota de aceite. La velocidad de la gota puede ser

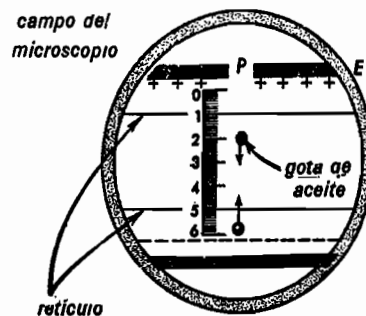


Fig. 30G. Campo de visión del microscopio mostrando la gota de aceite.

determinada usando un cronómetro y midiendo el tiempo necesario para que descienda la distancia que separa las dos líneas de la retícula señaladas en la figura 30G.

Al acercarse la gota a la placa inferior, se pasa el interruptor S a la posición de *baja*, cargando las dos placas paralelas, una con electricidad positiva y la otra con negativa. Si ahora la gota tiene una carga negativa, como se ilustra en la figura 30H(b), habrá una fuerza electrostática, F_e , hacia arriba, impulsando la gota en el mismo sentido, dentro del campo visual.

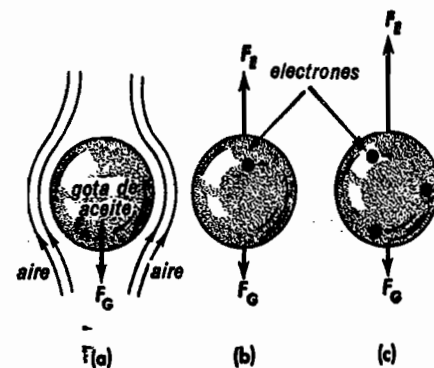


Fig. 30H. Diagrama de la gota de aceite con carga electrónica extra.

La gota se moverá hacia arriba con una velocidad constante si F_E es mayor que la fuerza gravitacional F_G . Usando de nuevo el cronómetro, para medir esta vez la velocidad de subida, se puede calcular la fuerza hacia arriba, F_E . Conociendo esta fuerza y la diferencia de potencial de las placas del condensador, se puede calcular la carga de la gota de aceite.

Cuando la gota se acerca a la placa superior, se pasa el interruptor S a *sube* y las placas vuelven a conectarse a tierra. En estas condiciones, la gota cae otra vez por la atracción de la gravedad. Al acercarse a la placa inferior, se vuelve a bajar el interruptor, y la gota vuelve a subir. Cuando se repite este proceso, una sola gota puede hacerse mover para arriba y abajo muchas veces en medio del campo visual. *Cada vez que cae, se mide la velocidad y se calcula la masa; mientras que cada vez que sube, se mide la velocidad y se calcula la carga.*

Millikan encontró que si se permitía el paso de rayos X a través del aparato mientras estaba observándose la gota, la carga de ésta podía aumentarse o disminuirse a voluntad. A veces, al subir, la velocidad sería pequeña, debido a una carga reducida (ver el diagrama (b) de la figura 30H), mientras que, en otros casos, la velocidad sería grande, debido a una carga mayor, como en el diagrama (c). Sin importar la carga que posea, la rapidez de caída de la gota es siempre la misma. La razón de esto es que la masa total de unos cuantos electrones es tan pequeña, comparada con la de la gota de aceite, que dicha masa adicional no es perceptible.

Millikan y muchos otros experimentadores que han repetido estos experimentos, encontraron que la carga de una gota nunca es menor que cierto valor mínimo y siempre es un múltiplo entero de ese valor. En otras palabras, cualquier electrón es igual a los demás electrones, llevando cada uno la carga mínima llamada e .

$$e = 1.6019 \times 10^{-19} \text{ culombios} \quad (30a)$$

Este es el valor más reciente y más probable de la carga del electrón.

Midiendo exactamente la desviación de un haz de electrones al pasar por un campo magnético (ver la fig. 30E), y usando el valor de la carga del electrón dado anteriormente, se encontró que la masa de un electrón es

$$m = 9.1072 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (30b)$$

Esta masa es increíblemente pequeña; pero su valor ha sido determinado muchas veces y por muchos experimentadores, y la masa de todos los electrones resulta siempre la misma.

30.4 Proyector de electrones. En la fig. 30I se ve un diagrama esquemático de un proyector de electrones. La fuente de los electrones es un cátodo, K , cubierto de óxido. Estos cátodos consisten simplemente en un pequeño vaso de metal delgado, revestido en su superficie exterior con una capa delgada de un compuesto químico,

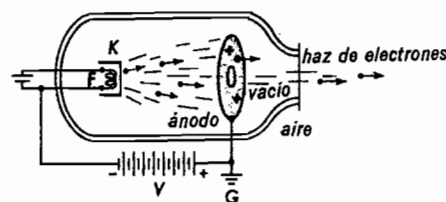


Fig. 30I. Los electrones son acelerados por un potencial V aplicado.

de óxido de torio, estroncio o cesio. Estos óxidos son buenos emisores de electrones cuando el filamento F los calienta al rojo oscuro.

El cátodo y el filamento se conectan al borde negativo, y el disco circular del centro, al positivo, de una batería, V , de tensión elevada. Partiendo del reposo en el

cátodo, los electrones son acelerados a lo largo de las líneas eléctricas de fuerza, adquiriendo una velocidad v para cuando llegan al ánodo.

Conectando la terminal (+) a tierra, se hace que el potencial del ánodo sea el mismo que el de las paredes del local, y los electrones después de pasar a través del disco del ánodo no son atraídos hacia él, sino que seguirán adelante con velocidad constante. Con una lámina delgada de aluminio en el extremo del tubo y aplicando un alto voltaje, V , se pueden proyectar electrones al aire exterior.

Uno de los resultados de los experimentos de J. J. Thomson,* con rayos catódicos, fue el descubrimiento de que la velocidad de los electrones depende del potencial aplicado entre el ánodo y el cátodo. Cuanto más alta es la tensión, mayor es la velocidad del electrón. Ya que la energía necesaria para llevar una carga eléctrica, Q , a través de una diferencia de potencial, V , es igual a $V \times Q$, la energía cinética adquirida por la carga de un electrón, e , cayendo a través de una diferencia de potencial, V , será $V \times e$. Igualando esto con la energía cinética $\frac{1}{2}mv^2$,

$$Ve = \frac{1}{2}mv^2 \quad (30c)$$

donde V , es el potencial acelerador aplicado en voltios; m , es la masa en kg; v , la velocidad en metros por segundo, y e , la carga de la partícula en culombios.

Ejemplo. Calcular la velocidad de los electrones acelerados por un potencial de 10 000 voltios. (La carga del electrón $e = 1.60 \times 10^{-19}$ culombios, y la masa $m = 9.1 \times 10^{-31}$ kg.)

Solución. Sustituyendo directamente en la ec. (30c), tenemos

$$10\,000 \times 1.6 \times 10^{-19} = \frac{1}{2}(9.1 \times 10^{-31}) \times v^2$$

de donde

$$v^2 = \frac{10\,000 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2}{9.1 \times 10^{-31}}$$

$$v = \sqrt{\frac{10\,000 \times 16 \times 10^{-19} \times 2}{9.1 \times 10^{-31}}}$$

$$= 0.59 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

Esto es una quinta parte de la velocidad de la luz. (La velocidad de la luz $c = 3 \times 10^8$ m/seg)

En lugar de calcular la velocidad de los electrones en metros por segundo, se acostumbra referirse a su energía cinética en función del voltaje aplicado. Por ejemplo, en el problema anterior, la energía conseguida por los electrones se dice que es de 10 000 electrón-voltios (abr. 10 000 *ev*). A veces también se denominan 10 000 voltios-electrones.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Cuál es el aspecto general de la primera descarga en el vacío en un tubo cuando se baja la presión?
2. ¿Cuál es el resplandor negativo? ¿Cuál es la columna positiva?
3. ¿Cuáles son las estrias? ¿Cuál es el espacio oscuro de Faraday? ¿Cuál es el espacio oscuro de Crookes?
4. ¿Qué es un cátodo? ¿Qué es un ánodo?
5. ¿Cómo se puede demostrar que los rayos catódicos viajan en línea recta? ¿Dónde se originan los rayos catódicos?
6. ¿Cómo se puede demostrar que los rayos catódicos tienen cantidad de movi-

* Sir Joseph John Thomson (1856-1940), físico inglés, educado en el Colegio Owens, de Manchester y en el Colegio Trinity, de Cambridge. Fue nombrado profesor Cavendish en Cambridge, en 1884, y profesor de física en la Institución Real de Londres, en 1905. Recibió el Premio Nobel en física, en 1906; fue armado caballero en 1908 y elegido presidente de la Sociedad Real en 1915. Fue nombrado maestro del Colegio Trinity, en 1918, y ayudó a desarrollar en Cambridge un gran laboratorio de investigación, atrayendo trabajadores científicos de todo el mundo.

miento y energía? ¿Tienen masa los rayos catódicos?

7. ¿Cómo se puede probar que los rayos catódicos: a) son partículas cargadas, y b) que su carga es negativa?

8. ¿Tienen poder de penetración los rayos catódicos?

9. ¿Qué evidencia existe en los experimentos aquí descritos de que los rayos catódicos son todos iguales y tienen la misma masa y carga?

10. ¿De qué depende el color de la luz de la columna positiva de un tubo de descarga eléctrica? ¿Cómo está relacionado con los *anuncios neón* actuales?

11. ¿Cómo es el experimento de Millikan de la gota de aceite? ¿Cuál es su propósito?

12. ¿Qué determina la velocidad de caída de una gota de aceite? ¿Es constante su velocidad de caída?

13. ¿Qué determina la velocidad de subida de una gota de aceite? La velocidad de subida de la gota de aceite, ¿es la misma cada vez que sube?

14. ¿Qué se determina por la rapidez de caída de una gota de aceite? ¿Qué se determina por su rapidez de subida?

15. ¿Cuál es el propósito de los rayos X en el experimento de la gota de aceite?

16. ¿Qué conclusiones se pueden sacar del experimento de J. J. Thompson? ¿Qué conclusiones se pueden sacar del experimento de Millikan de la gota de aceite?

17. Hacer un diagrama de un proyector de electrones. Explicar brevemente dónde se

originan los electrones y qué determina su velocidad máxima.

18. ¿Cuántos electrones equivalen a la masa de un gramo?

19. Si se aplica una fuente de 2 000 voltios a un proyector de electrones, encontrar la velocidad de los electrones. (Resp. 2.66×10^7 m/seg.)

20. Se conecta una batería de 2 500 voltios a los electrodos de una proyector de electrones. Encontrar la rapidez de los electrones.

21. ¿Qué voltaje aplicado a un proyector de electrones dará a los electrones una décima de la velocidad de la luz. Tómese la velocidad de la luz como 3×10^8 m/seg. (Resp. 2 560 voltios.)

22. Si los electrones de un proyector de electrones tienen una velocidad de un vigésimo de la velocidad de la luz. ¿Qué voltaje se ha aplicado? La velocidad de la luz es de 3×10^8 m/seg.

23. El haz de electrones de un osciloscopio es acelerado por un potencial aplicado a 5 000 voltios. Encontrar la rapidez de los electrones. (Resp. 4.22×10^7 m/seg.)

24. El haz de electrones que barre la pantalla de un receptor de televisión es acelerado por un potencial de 10 000 de voltios aplicado a un proyector de electrones. Encontrar la rapidez de los electrones.

25. ¿Qué voltaje aplicado a un proyector de electrones en un receptor de televisión dará a los electrones que barren la pantalla una velocidad de un sexto de la de la luz? (La velocidad de la luz = 3×10^8 m/seg.) (Resp. 7 120 voltios.)

31

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS ATOMOS

31.1 El descubrimiento de los rayos positivos. Durante la última parte del siglo XIX, cuando muchos físicos estaban investigando las propiedades de los rayos catódicos, Goldstein construyó un tubo especial de descarga y con él descubrió unos nuevos rayos llamados *rayos canales*. El nombre de *rayo canal* se deriva del alemán *kanal strahlen*, y del hecho de que los rayos, avanzando en líneas rectas a través del tubo de vacío en sentido opuesto al de los rayos catódicos, pasan y salen por un agujero abierto en el cátodo. En la figura 31A se ve un tubo diseñado para mostrar este fenómeno.

En 1896, W. Wien desvió un haz de rayos canal en un campo magnético y llegó a la conclusión de que contenían partículas cargadas positivamente. Debido a este y otros experimentos, se han hecho más conocidos los rayos canal como *rayos positivos*.

Desde la época del descubrimiento de Goldstein, se ha encontrado que los rayos positivos son átomos cargados, de pesos diferentes. El origen de la carga que llevan estos átomos se explica brevemente como sigue: Mientras los electrones del cátodo corren a lo largo del tubo hacia el ánodo, chocan ocasionalmente con los átomos y moléculas de la pequeña cantidad de gas residual, y les arrancan algunos electrones. Este proceso, llamado *ionización*, se ilustra por el diagrama esquemático de un átomo de oxígeno, en la fig. 31B. Antes del choque, el átomo como unidad, con sus ocho electrones y sus ocho cargas positivas en el núcleo, no tiene carga. Después de que ha perdido un electrón por el choque, tiene sólo siete electrones y, por lo tanto, una carga positiva equivalente a la carga de un electrón.

Ya que el átomo está ahora cargado positivamente, el ánodo lo repele y el cá-

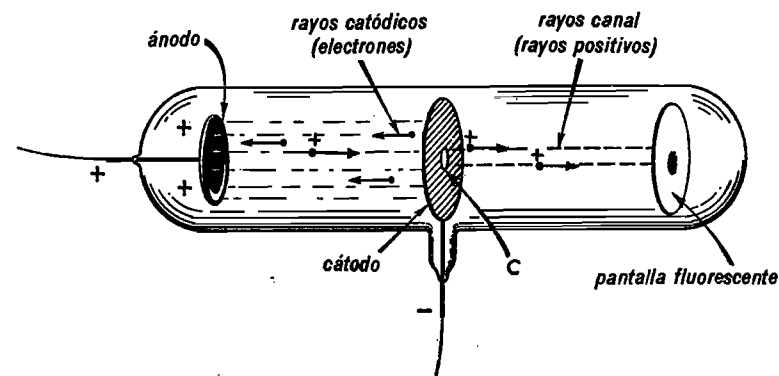


Fig. 31A. Los rayos canal, descubiertos por Goldstein.

todo lo atrae, acelerándolo hacia él. Por tanto, existen entre el ánodo y el cátodo dos corrientes de partículas: electrones avanzando hacia el ánodo y átomos o moléculas con carga positiva, moviéndose hacia el cátodo.

De las muchas partículas que caen sobre el cátodo, en la fig. 31A, las que pasan

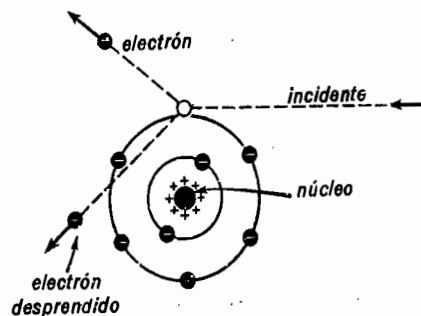


Fig. 31B. Un átomo de oxígeno que es ionizado por el choque con un electrón que se mueve con alta velocidad.

por la pequeña abertura C, constituyen los rayos canal observados, los cuales continúan en línea recta hasta la pantalla fluorescente. Cada vez que un átomo o molécula choca sobre la pantalla, se produce un pequeño destello de luz. Estos destellos, que pueden verse individualmente

en el campo visual de un microscopio, son llamados *centilaciones* (centelleos).

Cualquier proceso en el que se quite un electrón a un átomo o molécula, es llamado ionización, y las partículas cargadas que resultan, son llamadas *iones positivos*. La cantidad de carga que lleva un ion positivo, es igual a la carga del electrón, pero de signo contrario.

$$e = +1.6019 \times 10^{-19} \text{ culombios}$$

31.2 El espectrógrafo de masas de Thomson. Desde que se demostró que los rayos canal eran átomos o moléculas cargados positivamente del gas contenido dentro de los tubos de descarga, los físicos han tratado de determinar, cada vez con mayor precisión, la masa y la carga de las partículas individuales de estos rayos. Si bien era conocido por los experimentos de Thomson y Millikan que la carga y la masa de cada electrón son las mismas, se podrá prever que la masa de los rayos positivos debería ser diferente para los átomos de los diversos elementos químicos. Podía suponerse, además, que si cada ion positivo es producido cuando un átomo neutro pierde un electrón, todos los iones positivos debían tener la misma carga. Esto

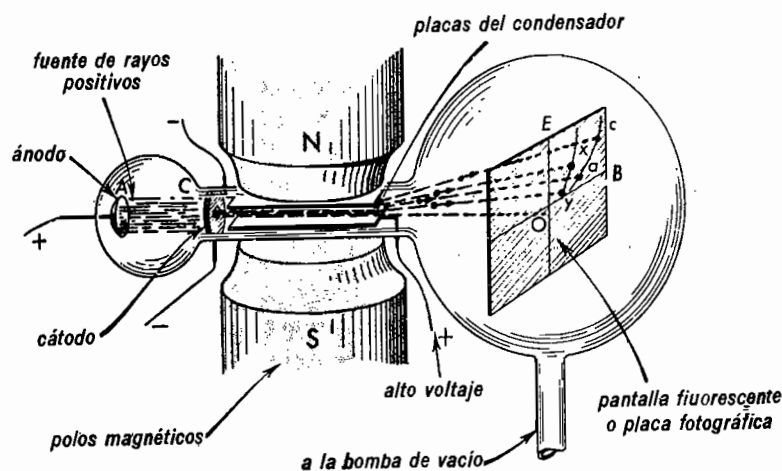


Fig. 31C. Espectrógrafo de masas de J. J. Thomson.

anticipó parte de lo que ahora ha sido confirmado.

En 1911, J. J. Thomson desarrolló un método para medir las masas relativas de diferentes átomos y moléculas, desviando los rayos positivos en un campo magnético, y eléctrico. El aparato que proyectó para ello, se presenta esquemáticamente en la fig. 31C y se llama *espectrógrafo de masas, de Thomson*.

Primero se hace el vacío en el espectrógrafo, encerrado todo él en una cámara hermética de vidrio, y después se admite en el bulbo de la izquierda una pequeña cantidad del gas a cuyos átomos se les va a determinar la masa. Cuando se aplica un alto voltaje a esta cámara, los electrones del cátodo ionizan a los átomos y las moléculas que están en la región que queda entre el ánodo A y el cátodo C. Avanzando hacia la derecha, muchas de estas partículas cargadas positivamente pasan por la estrecha abertura que tiene el cátodo, formando un haz de rayos muy delgado. Alejándose del cátodo con una velocidad constante, cruzan entre los polos de un electroimán y entre las dos placas paralelas de un condensador, y de ahí a una pantalla fluorescente que está en el extremo más alejado de la cámara.

Al ser cargadas las dos placas paralelas, crean un campo eléctrico uniforme que ejerce una fuerza hacia arriba sobre las partículas, desviándolas del punto O hacia E. El campo magnético uniforme, por otra parte, con sus líneas magnéticas verticales hacia abajo y en el plano del dibujo, ejercen una fuerza perpendicular a esta dirección, desviando las partículas hacia detrás de la página, del punto O hacia H.

Supongamos ahora que el aparato contiene un gas puro (como el helio) y todos los átomos tienen exactamente la misma masa. De estos átomos, aquellos que son ionizados en una región cercana al cátodo C, no pueden alcanzar la velocidad muy grande antes de llegar a éste. Permaneciendo más tiempo en los campos de

las hacia arriba y atrás, hasta un punto como el c de la pantalla. Las partículas ionizadas cerca del ánodo A, por otra parte, tienen gran velocidad cuando alcanzan el cátodo y estando poco tiempo bajo la acción deflectora de los campos, sus trayectorias son poco desviadas, hacia un punto como el a de la pantalla. Ya que las velocidades de las partículas varían considerablemente, aparecerá en la pantalla una línea brillante de fluorescencia. Por los cálculos hechos basándose en las fuerzas ejercidas por los dos campos, se encuentra que la línea producida en la pantalla debe tener la forma de una parábola.

Si el gas que está dentro del aparato contiene dos clases de átomos, los iones positivos que pasan a través del cátodo tendrán dos masas diferentes. Aunque ambos contienen la misma carga positiva y, por lo tanto, sufren las mismas fuerzas eléctricas y magnéticas cuando pasa por los campos, las partículas más pesadas no se desvían tanto como las ligeras. El resultado es que las partículas más pesadas forman una curva parabólica como xy, y las partículas más ligeras otra curva como ac.

Colocando una placa fotográfica en vez de la pantalla fluorescente y exponiéndola a los rayos durante varios minutos, se obtienen fotografías como las que se reproducen en la fig. 31D. El bombardeo con-

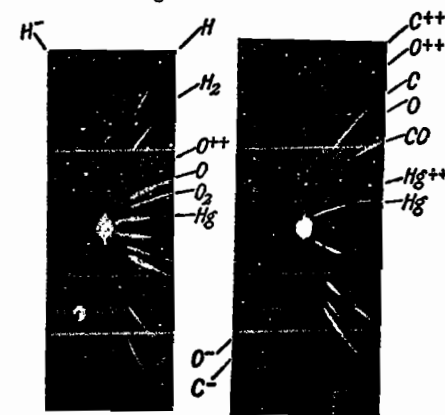


Fig. 31D. Fotografías de parábolas producidas con el espectrógrafo de masas de Thomson.

tinuo de la placa fotográfica por los átomos y moléculas, tiene el mismo efecto que la luz, y cuando se revela la película, produce imágenes. La mitad superior de cada fotografía se tomó con las conexiones de la fig. 31C, y la mitad inferior invirtiendo la polaridad del electroimán y exponiendo el mismo período.

Cuando se tomó la fotografía (a), el espectrógrafo contenía *hidrógeno, oxígeno y mercurio* y el campo magnético era relativamente débil. Se puede calcular la masa de los átomos que produjeron cada parábola partiendo de los valores conocidos de las intensidades de los campos eléctrico y magnético y suponiendo que cada átomo lleva una carga positiva unidad. El resultado de estos cálculos hace ver que las dos parábolas más grandes se deben a átomos ionizados de hidrógeno (H^+) de masa 1, y moléculas ionizadas de hidrógeno (H_2^+) de masa 2. Las tres parábolas siguientes se deben a átomos ionizados (O^+) de oxígeno de masa 16, moléculas ionizadas de oxígeno de masa 32, y átomos ionizados de mercurio (Hg^+) que tienen una masa aproximada de 200.

Cuando se tomó la fotografía (b), el espectrógrafo de masas contenía monóxido de carbono y vapor de mercurio como gas, y el campo magnético era relativamente fuerte. Al calcular las masas de las partículas que producen las diferentes parábolas, se identificaron las cuatro líneas intensas como producidas por átomos ionizados de carbono (C^+) de masa 12, átomos ionizados de oxígeno (O^+) de masa 16, moléculas ionizadas de monóxido de carbono (CO^+) de masa 28 y átomos ionizados de mercurio (Hg^+) de masa próxima a 200. Las tres parábolas tenues que se ven en la fotografía original, pero que probablemente no aparecen en la reproducción, se deben a átomos doblemente ionizados de *carbono, oxígeno y mercurio*.

Un átomo o molécula doblemente ionizado es aquel que ha perdido dos electrones en vez de uno y, teniendo una car-

ga positiva de dos unidades, se designa con dos (+) como índice superior. Ya que las partículas tienen doble carga, las fuerzas eléctrica y magnética ejercidas sobre ellas es doble de la que sufren los átomos ionizados con una carga, y, por tanto, aquéllas sufren mayores desviaciones produciendo parábolas más abiertas.

Las conclusiones principales que se pueden sacar de los experimentos de Thomson, son: 1) *que los rayos positivos o rayos canal son átomos o moléculas cargadas del gas que está presente dentro del aparato*; 2) *que las moléculas de hidrógeno y oxígeno tienen dos veces el peso de sus átomos simples y que, por lo tanto, son diatómicas*; 3) *que un compuesto químico como el monóxido de carbono está formado de moléculas diatómicas CO, cada una de las cuales pesa la suma de los pesos de sus átomos*.

Es importante señalar aquí que, aunque Thomson encontró que muchos átomos podrían ser ionizados el doble o el triple, el hidrógeno sólo se pudo encontrar con ionización simple, y el helio sólo con doble ionización. La razón de esto, como se verá más adelante, es que los átomos neutros de hidrógeno tienen sólo un electrón y los átomos neutros de helio tienen dos. Todos los demás elementos poseen más de dos electrones.

31.3 La tabla periódica de los elementos. De los conocimientos actuales de física, química y astronomía, parece bastante seguro que todo el universo está hecho con unos 90 ó 100 elementos. Se entiende por elemento una sustancia compuesta de átomos con propiedades químicas idénticas. Se han encontrado cerca de 90 de estos elementos en la corteza terrestre, algunos de ellos mucho más abundantes que otros. El silicio y el hierro son ejemplos de elementos abundantes, mientras que el platino es un ejemplo de elemento escaso.

Mucho antes de que se hubiera proyectado y usado el espectrógrafo de Thomson para medir la masa relativa de los átomos, los químicos habían ordenado todos los

elementos de acuerdo con sus pesos atómicos en una tabla. La forma más común de este arreglo se presenta en el Apéndice VI. Divididos como están en ocho grupos separados, todos los elementos que se encuentran en la misma columna tienen propiedades químicas semejantes. En el grupo I, por ejemplo, los elementos Li, Na, K, Rb, Cs y Fa, conocidos como *metales alcalinos*, tienen ciertas propiedades químicas comunes, mientras que los elementos Be, Mg, Ca, Sr, Ba y Ra, del grupo II conocidos como los *alcalinotérreos*, tienen otro grupo de propiedades químicas iguales. El grupo más grande de elementos que tienen propiedades químicas semejantes, está formado por las catorce tierras raras que se agrupan separadamente al final de la Tabla.

Todos los nombres de los elementos son indicados por símbolos de una o dos letras. Los nombres completos se encuentran en la segunda columna del Apéndice III. El número que precede a cada abreviatura es el número de orden del elemento y se llama *número atómico*. El peso promedio de los átomos de este elemento, llamado *peso atómico*, se da en la última columna.

Los pesos atómicos de todos los elementos se relacionan con el peso del oxígeno que se considera que es 16. Esta es una elección de unidad de peso arbitraria, pero que tiene significación considerable cuando se observa que los pesos de los primeros 25 elementos, exceptuando al Mg y al Cl, de números atómicos 12 y 17, son muy próximos a números enteros. Al comienzo de la historia de las investigaciones sobre la estructura atómica, se sugirió la posibilidad de que los pesos de todos los átomos fueran en realidad múltiplos enteros de la unidad de peso, el átomo de hidrógeno, y aquellos pesos de elementos que diferían considerablemente de un número entero eran valores mal determinados. En el apogeo de esta teoría, Prout propuso la hipótesis de que todos los elementos estaban formados de átomos de hidrógeno, como si fueran piedras en una

construcción. Esta suposición, como se verá más tarde, era cierta sólo en parte.

31.4 Descubrimiento de los isótopos hecho por Thomson. En 1912, Thomson comparó la masa de los átomos de neón con las masas conocidas de otros elementos, y descubrió dos parábolas de neón en vez de una. Al calcular las masas de las partículas que originaron esas curvas, la mayor de las dos parábolas resultó ser debida a partículas de masa 20 y la otra, una parábola más tenue, a partículas de masa 22.

Puesto que se sabía entonces que el peso atómico del neón es de 20.2, Thomson expresó la creencia de que el neón estaba compuesto de dos clases de átomos, 90% de los cuales tenían masa 20 y el otro 10% una masa 22. Debido a que esas dos clases de átomos existen como una mezcla y no pueden separarse químicamente, su peso atómico, al ser medido por métodos químicos, da un valor promedio de 20.2.

El descubrimiento de las dos clases de átomos de neón, idénticos químicamente pero diferentes en su peso atómico, sugirió la posibilidad de que todos los demás elementos cuyo peso atómico no era un número entero podría también ser una mezcla de átomos que sí tuvieran pesos enteros. No sólo se ha confirmado esto experimentalmente, sino que una gran mayoría de los elementos han resultado ser mezclas de dos y hasta de diez clases diferentes de átomos.

A todos los átomos de diferente peso que corresponden al mismo elemento, Soddy les dio el nombre de *isótopos*. La estructura externa de todos los isótopos de un elemento dado, es idéntica. Los dos átomos Ne-20 y Ne-22, que se ven en la fig. 31E, son isótopos del neón. Cada uno de estos átomos neutros, antes de ser ionizados para convertirse en rayos positivos tienen 10 electrones exteriores y 10 cargas positivas dentro del núcleo. Difieren sólo en la masa de estos últimos.

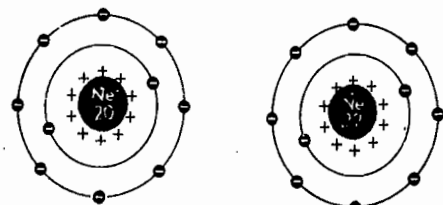


Fig. 31E. Diagramas de dos átomos diferentes de neón, uno de masa 20 y otro de masa 22. La estructura exterior de electrones es idéntica en los dos isótopos.

31.5 Medidas de masas realizadas por Aston. Inmediatamente después de la Primera Guerra Mundial, en 1919, W. F. Aston* desarrolló un tipo nuevo perfeccionado de espectrógrafo de masas. Empleando tanto campos eléctricos como magnéticos, tiene este aparato la mejora sobre el espectrógrafo de Thomson, de enfocar

* Francis Wm. Aston (1877-1945), científico inglés, nacido en Birmingham y educado en el Colegio Malvern y la Universidad de Cambridge, llegó a ayudante de profesor de física en la Universidad de Birmingham en 1909, y recibió la medalla Mackenzie Davidson de la Sociedad Röntgen en 1920. En 1922 le confirieron la medalla Hughes de la Sociedad Real y el Premio Nobel en química por sus trabajos en la medida de las masas atómicas. Ha escrito un libro clásico titulado *Isótopos*, en el que da un informe completo sobre sus trabajos.

los rayos de diferentes velocidades al mismo punto de la pantalla o de la placa fotográfica. Esto tuvo dos resultados importantes: 1), hizo posible observar los isótopos escasos que de otra manera podían escapar a su descubrimiento, y 2), produjo en las placas fotográficas imágenes más definidas de las diferentes masas, de manera que éstas podían medirse más exactamente.

En la parte superior de la fig. 31F se reproduce un espectrograma de masas de Aston. Al tomar esta fotografía, Aston introdujo en el aparato, entre otras cosas, un poco de ácido clorhídrico (HCl), monóxido de carbono (CO), y dióxido de azufre (SO₂). Por encontrarse cerca entre sí en la tabla periódica, estos elementos proporcionan una excelente demostración del desplazamiento lineal de los átomos y moléculas que difieren en una unidad de masa. De ésta y otras fotografías se encuentra que el azufre tiene tres isótopos con masas 32, 33 y 34, y que el cloro tiene dos, de masas 35 y 37.

Ya que el peso atómico del cloro es de 35.46, por cada átomo de masa 37 habrá cuatro de masa 35, en una cantidad dada de cloro gaseoso. Mezclados en estas pro-

porciones nos dan una masa promedio de 35.4.

Las líneas fotográficas correspondientes a las masas 28, 36 y 38, se deben a moléculas diatómicas CO y HCl, teniendo cada molécula la masa combinada de sus átomos constitutivos. Ya que hay dos isótopos del cloro relativamente abundantes, habrá dos clases de moléculas de HCl. Un tipo H³⁵Cl tiene una masa de 36 y el otro H³⁷Cl de masa 38.

Una molécula de CO del tipo que produce la línea fuerte para una masa de 28 en la fig. 31F (a), se ilustra esquemáticamente en la fig. 31G. Siendo una molécula

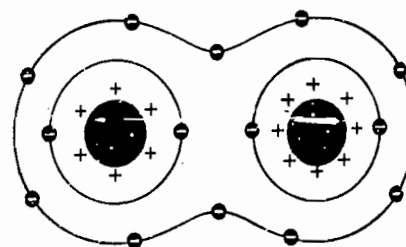


Fig. 31G. Una molécula diatómica de monóxido de carbono, CO.

neutra, el número de electrones que rodean a los dos átomos enlazados, será igual al número de cargas positivas que hay en los núcleos (seis en el núcleo de carbono y ocho en el núcleo de oxígeno). Cuando se ioniza la molécula y avanza dentro del aparato como un rayo positivo, contiene un electrón menos del número señalado. Ya que la masa de los electrones es despreciablemente pequeña, la masa de la molécula es 12 + 16, o sea, 28 unidades de masa.

Aston tuvo tanto éxito con sus medidas de las masas y sus determinaciones de los isótopos de los diferentes elementos, que intentó una investigación de toda la tabla periódica. En el Apéndice III se da una lista de todos los elementos conocidos con todos los isótopos que se han observado. En cada caso el isótopo más abundante se da con tipos gruesos, mientras que los isó-

topos más raros, es decir, aquellos que están presentes en menos de 1 por ciento, se dan entre paréntesis. Donde hay más de un isótopo dado con tipo grueso, significa que dichos isótopos se presentan casi con la misma abundancia. La gráfica final de dicho apéndice comprende los átomos inestables que son responsables de la *radioactividad*, que será el tema del Capítulo 34. Los recientes adelantos de la espectrografía de masas, han hecho posible descubrir isótopos excepcionalmente raros. Por ejemplo, en el neón, se ha encontrado además un isótopo de número de masa 21, haciendo un total de tres con la composición relativa siguiente:

Isótopo	Ne ²⁰	Ne ²¹	Ne ²²
Abundancia %	90.4	0.6	9.0

En el monóxido de carbono puro gaseoso, todas las moléculas son diatómicas e iguales en todos sus aspectos, excepto la masa. Ya que hay dos isótopos de carbono, 12 y 13, y tres isótopos de oxígeno, 16, 17 y 18 (ver el Apéndice III), habrá seis combinaciones diferentes de átomos formando moléculas. Estas son: C¹²O¹⁶, C¹²O¹⁷, C¹²O¹⁸, C¹³O¹⁶, C¹³O¹⁷ y C¹³O¹⁸. La abundancia relativa de todos los isótopos excepto el C¹² y O¹⁶, es tan pequeña que más del 90% de las moléculas del gas son del tipo C¹²O¹⁶, con masa 28.

31.6 Isóbaros. Otro espectrógrafo de masas de notable precisión fue desarrollado en 1933 por el físico americano K. T. Bainbridge.

En la fig. 31F se ven dos fotografías tomadas con este instrumento. La fotografía del medio (b), presenta los numerosos isótopos del estaño y la inferior (c), los isótopos del mercurio y el plomo. El raro isótopo 204 del plomo cae encima del isótopo de mercurio muy abundante 204. Estos átomos que coinciden en masa son llamados *isóbaros*.

Los átomos que tienen la misma masa, pero que pertenecen a diferente elemento

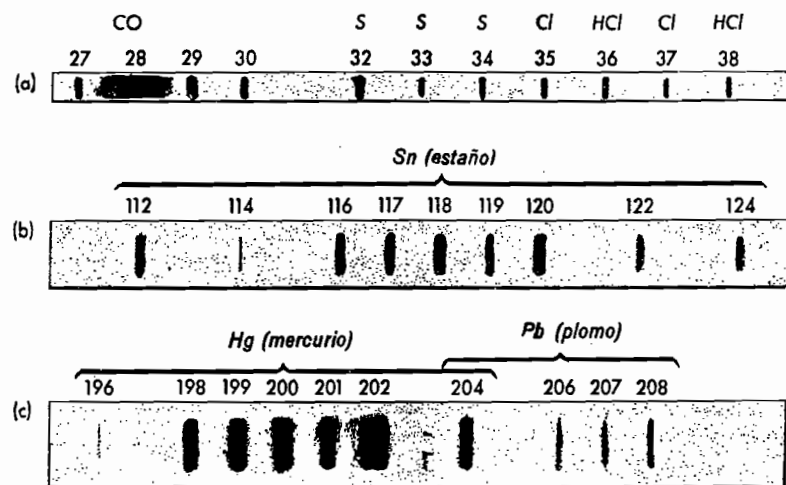


Fig. 31F. Fotografías tomadas con un espectrógrafo de masas ilustrando el corrimiento lineal entre átomos que difieren en una unidad atómica de masa: (a) líneas de monóxido de carbono, azufre, cloro y argón; (b) y (c) isótopos de estaño, mercurio y plomo.

químico, son llamados *isóbaros*. El primer par de isóbaros (ver Apéndice III), se presenta en el argón y el calcio. El principal isótopo del argón, de número atómico 18, tiene una masa de 40, igual que el isótopo principal del calcio de número atómico 20. Otros ejemplos se encuentran en Cr 54 y Fe 54, Ge 76 y Se 76, Rb 87 y Sr 87, Zn 92 y Mo 92. Los isóbaros Hg 204 y Pb 204, se ilustran en la figura 31F(c).

31.7 La unidad de masa y el átomo de hidrógeno. Hasta 1927 se pensaba que todos los átomos de oxígeno tenían la misma masa y se escogieron arbitrariamente como el patrón con el cual se miden todas las masas atómicas. En ese tiempo, Giauque y Johnson descubrieron la existencia de dos isótopos raros del oxígeno con masas 17 y 18. Son tan raras estas partículas más pesadas, que en cada 10 000 átomos de oxígeno sólo hay 16 que tengan masa 18 y 3 de masa 17.

La selección arbitraria de la masa atómica unidad, se toma, por tanto, como la dieciseisava parte de la masa del isótopo 16 del oxígeno. Sobre esta base las medidas espectrográficas de masa muy exactas, dan para la masa del átomo de hidrógeno, 1.008, un valor casi uno por ciento más elevado que la unidad. Esta aparente discrepancia es real, y como veremos en capítulos posteriores sobre la desintegración nuclear, tiene un papel importante en el Sol y en las estrellas como fuente de energía atómica.

Para comparar las masas de los átomos con la masa de un electrón es conveniente saber la masa del átomo en kilogramos. Esta masa se puede calcular conociendo su equivalencia en unidades atómicas de masa, siendo definida la *unidad atómica de masa* como un dieciseisavo de la masa de un átomo de oxígeno 16. Se encuentra experimentalmente que esta unidad de masa es

$$M = 1.6600 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad (31a)$$

este número multiplicado por el "peso atómico" de cualquier átomo, nos da su masa en kilogramos.

Comparado con la masa del electrón, que es

$$m = 9.1072 \times 10^{-31} \text{ kg} \quad (31b)$$

un átomo de masa unidad pesaría 1 824 veces ésta. El átomo de hidrógeno es ligeramente más pesado que una masa unidad y tiene aproximadamente 1 840 veces el peso del electrón. Este último número es conveniente que se recuerde, porque se va a citar con frecuencia para ilustrar la enorme diferencia entre la masa de un átomo de hidrógeno y la de su único electrón.

El hidrógeno tiene dos isótopos, de masas 1 y 2. El isótopo más pesado comparado con el hidrógeno-1 más común, tiene una abundancia natural de 1 parte en 4 000. El gas que contiene sólo átomos y moléculas de hidrógeno-2, se llama *deuterio*. El núcleo del átomo de deuterio se llama *deuterón*.

El número atómico se define como el número atribuido a un elemento para especificar su posición en la tabla periódica de los elementos. Véase la columna 1, Apéndice III.

El número de masa se define como el número entero más cercano a la masa real de un isótopo, medida en unidades atómicas de masa. Véase la columna 5, Apéndice III.

El peso atómico se define como el peso promedio de todos los isótopos de un elemento, ponderados de acuerdo con su abundancia relativa y expresados en unidades atómicas de masa.

La unidad atómica de masa, o masa atómica unidad, se define como un dieciseisavo de la masa de un átomo de oxígeno 16.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Qué son los rayos canal? ¿Quién los descubrió? ¿Cómo son detectados?

2. ¿Qué es un espectrógrafo de masas? Hacer un diagrama de él y explicar cómo opera.

3. Hacer un diagrama de un espectrógrafo de masas de Thomson. ¿Para qué se usa y cómo se interpretan sus resultados?

4. ¿Quién descubrió los isótopos? ¿Qué son los isótopos?

5. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes puntos: a) rayos positivos; b) número atómico; c) isótopos; d) peso molecular, y e) ionización.

6. Definir o explicar brevemente lo que sigue: a) rayos canal, b) isóbaros; c) peso atómico; d) número de masa, y e) ion positivo.

7. Nombrar los diez primeros elementos de la tabla periódica en el orden de su número atómico.

8. Nombrar los últimos diez elementos de la tabla periódica en el orden de su número atómico.

9. ¿Qué se entiende por abundancia relativa?

10. ¿Qué son los isóbaros? Dar un ejemplo.

11. ¿Cuánto mayor es la masa del átomo de hidrógeno que la masa de un electrón?

12. En la fig. 31F se encuentra un espaciado más o menos igual de las líneas. ¿Qué sugiere esta uniformidad en relación con las masas relativas de los átomos.

13. Nombrar cinco miembros de cada una de las siguientes clasificaciones: a) metales alcalinos, y b) alcalino térreos. Ver el Apéndice VI.

14. ¿Qué elemento químico tiene el mayor número de isótopos? Ver el Apéndice III.

15. Hacer una lista de elementos que tengan: a) átomos de una sola masa, y b) sólo dos isótopos. Ver el Apéndice III.

16. El peso atómico del aluminio es de 26.97. Encontrar la masa en kilogramos de un átomo de aluminio.

17. Si el peso atómico del cobalto es 58.94, ¿cuántos átomos hay en un kilogramo del metal cobalto? (Resp. 1.002×10^{25} .)

18. El peso atómico del manganeso es 54.94. ¿Cuántos átomos hay en un kilogramo del metal manganeso?

19. Si los pesos atómicos del carbono y el oxígeno son 12.00 y 16.00, respectivamente, encontrar la masa en kilogramos de una molécula de bióxido de carbono. Ver la figura 10A. (Resp. 7.30×10^{-28} kg.)

20. Los pesos atómicos de hidrógeno, carbono y oxígeno son 1.01, 12.00 y 16.00 respectivamente. ¿Cuántas moléculas de alcohol etílico hay en un kilogramo de alcohol? Ver la fig. 10A.

21. Calcular la masa, en kilogramos, de un: a) átomo, y b) una molécula de nitrógeno. (Resp. a) 2.32×10^{-26} kg; b) 4.64×10^{-26} kg.)

22. Encontrar la masa de un sólo átomo de: a) oro; b) manganeso, y c) yodo.

23. Determinar la masa de un solo átomo de: a) aluminio; b) manganeso, y c) oro. (Resp. a) 4.48×10^{-26} kg; b) 9.12×10^{-26} kg; c) 3.27×10^{-25} kg.)

24. Calcular la masa de una molécula de agua, H_2O .

25. Determinar la masa de una molécula de ácido fluorhídrico, HIF^{19} . Para las masas atómicas de los isótopos, ver el Apéndice IV (Resp. 3.32×10^{-26} kg.)

26. Calcular la masa de una molécula de ozono formada por átomos O^{16} . Ver la figura 10A. Usar el Apéndice IV para obtener las masas atómicas.

27. Encontrar la masa de una molécula de alcohol etílico si está formado por átomos C^{12} , H^1 y O^{16} . Ver la fig. 10A. Para las masas atómicas, ver el Apéndice IV. (Resp. 56.1082 unidades atómicas de masa, ó 9.31×10^{-26} kg.)

ESPECTROS ATOMICOS Y ESTRUCTURA ATOMICA

32.1 Clasificación de los espectros. Un espectro puede definirse como una sucesión de los diferentes colores, o longitudes de onda, de la energía radiante emitida por una fuente luminosa. Como se ilustra en la fig. 24H, un espectro generalmente se produce mandando luz blanca a través de un prisma de vidrio. Cada fuente de luz produce diferentes colores, y diversas longitudes de onda y, por tanto, da lugar a un espectro distinto.

Se pueden agrupar todos los espectros en cuatro clases:

- a) Espectro continuo de emisión,
- b) Espectro de líneas (rayas) de emisión,
- c) Espectro continuo de absorción,
- d) Espectro de líneas (rayas) de absorción.

32.2 Espectros continuos de emisión. Al calentarse lentamente hasta la incandescencia un trozo de metal, como hierro o cobre, el primer cambio notable en su apariencia se produce a una temperatura cercana a $1\,000^\circ\text{K}$. A esta temperatura, el metal tiene un resplandor rojo oscuro. Conforme sigue subiendo, el color cambia lentamente a naranja, luego a amarillo y finalmente a blanco.

Si el metal que se está calentando lentamente se observa a través de un prisma, la primera aparición de luz visible se encontrará en el extremo rojo del espectro. Conforme sube la temperatura, la luz se ensancha lentamente a través del espectro hasta que, estando al rojo blanco, se ve toda la gama de colores visibles, desde el rojo hasta el violeta. En el estado anaran-

jado, cuando la temperatura es cercana a $1\,500^\circ\text{K}$, el espectro contiene los colores rojo, anaranjado y amarillo, y cuando se llega al estado amarillo en que la temperatura es cercana a $2\,000^\circ\text{K}$, se incluye el verde en el espectro. Cuando se ha alcanzado el estado blanco a unos $3\,000^\circ\text{K}$, y se tiene completo el espectro; un aumento posterior de la temperatura sigue aumentando la intensidad de cada color, sin que cambie notablemente la coloración.

Lo que ha hecho el prisma en este experimento, es separar todas las ondas de luz, de acuerdo con su longitud de onda, quedando a un lado las ondas más largas, de luz roja, y al otro las ondas más cortas, de la luz violeta, y con las ondas intermedias en sus lugares correspondientes entre aquéllas. Ver la fig. 24K. El hecho de que la coloración sea continua del rojo hasta el violeta es característico del espectro de todos los sólidos y líquidos y significa que está presente una serie continua de todas las diferentes longitudes de onda.

Para demostrar la existencia de un espectro ultravioleta y uno infrarrojo, se puede hacer el experimento que se ilustra en la fig. 32A. La luz visible de una lámpara de arco de carbón se hace pasar a través de una lente y un prisma de cuarzo, para enfocarla sobre una pantalla cercana.

Si se pinta con pintura luminiscente la pantalla, en el extremo violeta del espectro se observará una brillante fluorescencia en una pequeña sección más allá del violeta visible. Cuando se reemplaza la

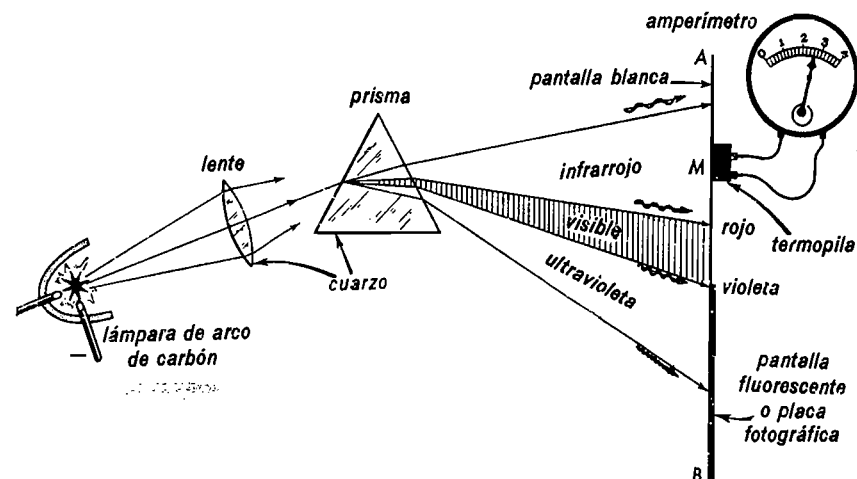


Fig. 32A. Experimento que demuestra la existencia de los rayos infrarrojos y ultravioletas más allá del espectro visible.

pantalla por una placa fotográfica, la imagen expuesta y revelada mostrará también la extensión del espectro hacia el ultravioleta.

Para confirmar la presencia de las radiaciones infrarrojas conviene usar una termopila (par termoelectrónico) en la parte superior de la pantalla, como se ve en la figura. La termopila conectada a un amperímetro, mide la cantidad de energía luminosa que incide sobre su cara delantera. Si se coloca primero la termopila de manera que reciba luz violeta y se mueve lentamente a través del espectro visible y más allá hasta la región infrarroja, el amperímetro marcará un aumento uniforme

de corriente. La intensidad de ésta seguirá subiendo hasta que se llega a un máximo en un punto en la región *M* y luego disminuirá lentamente conforme la termopila se acerca al extremo *A* de la pantalla.

Si se traza una gráfica de la energía radiada contra la longitud de onda de la luz, se obtiene una curva semejante a la de la fig. 32B. Si se eleva la temperatura de la fuente todos los puntos de la curva subirán, pero el pico se correrá hacia las longitudes de onda más cortas. Cuando se llega a la temperatura de la superficie del Sol, $6\,000^\circ\text{K}$, el pico se encuentra en la región amarilla del espectro visible.

32.3 Espectros de líneas de emisión. Cuando se ilumina la ranura de un espectrógrafo de prisma, véase fig. 32D, con la luz de un arco de mercurio, una lámpara de sodio, o un tubo de descarga de neón, aparecen en la pantalla (o en la placa fotográfica) un grupo de líneas brillantes (rayas) en lugar del espectro continuo. Véase la fig. 32C.

Es importante observar que el espectro de líneas deriva su nombre del hecho de que antes de entrar al prisma, la luz pasa a través de una ranura estrecha y que las distintas imágenes coloreadas de la ranura

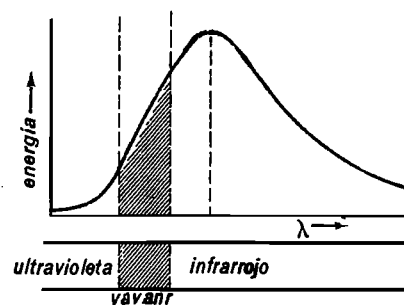


Fig. 32B. Gráfica de la energía emitida por un sólido caliente.

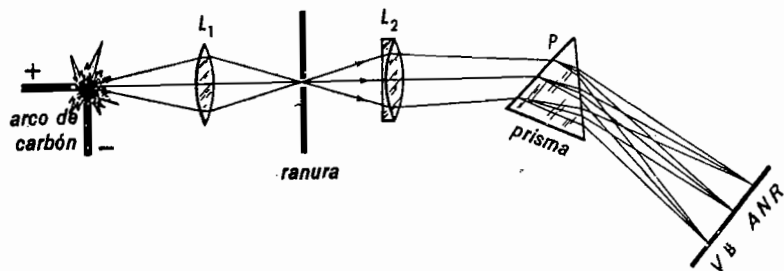


Fig. 32D. Producción de espectros de líneas de emisión.

formadas por la lente, son las que constituyen las líneas del espectro. Si se usara una pequeña abertura circular en vez de la ranura, aparecería una imagen en forma de disco en lugar de cada línea de la fig. 32C.

Las fuentes más intensas de espectros de líneas, se obtienen con arcos y chispas metálicas. La llama del arco de carbón, puede usarse para fines demostrativos empapando previamente el *electrodo positivo de carbón* con varios reactivos químicos. (El dispositivo que se ve en la fig. 32D puede usarse también para proyectar el espectro sobre una pantalla grande.) El agua salada corriente (cloruro de sodio en solución), da una línea amarilla brillante, característica del sodio. Las soluciones de cloruro de estroncio o de calcio presentarán otras líneas del espectro en el rojo, el verde y el azul.

Los espectros continuos de emisión se producen con sólidos incandescentes, mien-

tras que los espectros de líneas siempre se originan en un gas a alta temperatura. La llama de gas en el arco de carbón es la que da lugar al espectro de líneas de emisión, en el experimento anterior.

32.4 Espectros continuos de absorción.

Los espectros continuos de absorción, son generalmente producidos pasando un espectro continuo de emisión a través de materia en estado sólido o líquido. Se puede hacer una buena demostración permitiendo pasar luz blanca a través de un vidrio coloreado. Cuando después se dispersa la luz mediante un prisma, faltarán algunos colores que en general cubren una amplia banda de longitudes de ondas. Véase el espectro (b) de la fig. 32C. En el Capítulo 24 se describió el mismo experimento, exponiendo este caso particular en el diagrama (g) de la fig. 22H.

32.5 Espectros de líneas de absorción.

Los espectros de líneas de absorción son

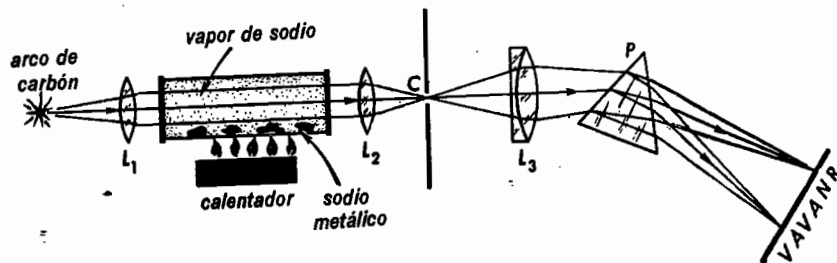


Fig. 32E. Producción del espectro de líneas de absorción del vapor de sodio.

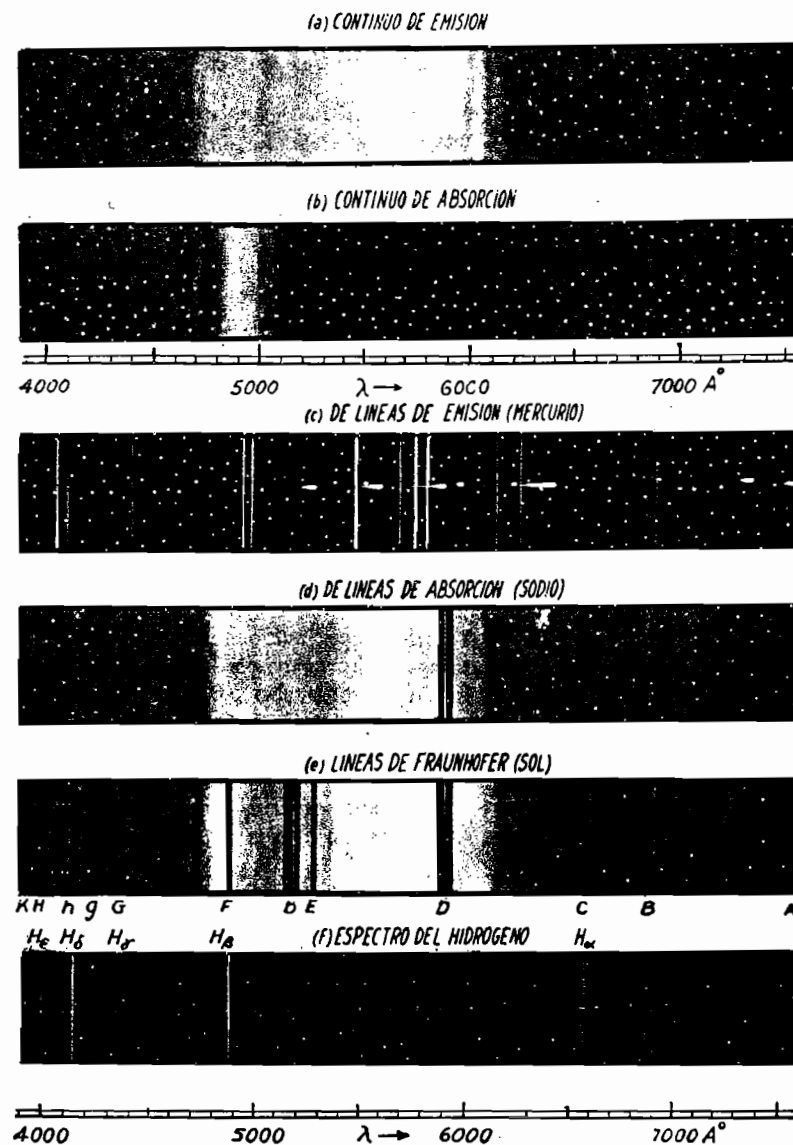


Fig. 32 C.—Espectros continuos y de líneas.



Fig. 32F. Espectro de absorción del vapor de sodio. La serie principal del sodio. (Según Jenkins.)

producidos mandando luz blanca continua a través de un gas. Experimentalmente se coloca el gas o el vapor en la trayectoria de la luz, como se ve en la fig. 32E. La luz de un arco de carbón, pasando como un haz de rayos paralelos a través de un tubo que contiene vapor de sodio, se enfoca sobre la ranura C. De aquí la luz pasa a través de una lente L_s y un prisma P , para formar un espectro sobre la pantalla de observación.

Se escoge el sodio como ejemplo para fines demostrativos, por su conveniencia. El vapor se produce insertando una pequeña cantidad de sodio metálico en un tubo de vidrio con vacío parcial y calentándolo con un pequeño mechero de gas. Conforme se vaporiza el metal, llenando el tubo con vapores de sodio, aparecerá una línea oscura en la región amarilla del espectro. (Véase la ilustración (d) a colores de la fig. 32C.)

Si se toma una fotografía de esta absorción, y la placa fotográfica es suficientemente grande para extenderse hasta el ultravioleta, se detectan muchas líneas de absorción, como se ve en la fig. 32F. Un ordenamiento sistemático de las líneas de absorción parecido a éste, se presenta sólo en unos pocos elementos, principalmente en los metales alcalinos, litio, sodio, potasio, rubidio y cesio. En cambio, en estado gaseoso todos los elementos dan origen a un grupo de líneas de absorción, generalmente en la región ultravioleta del espectro.

32.6 El átomo de Thomson. Al principio del siglo xx, mientras Rutherford,

Geiger y Marsden estaban realizando sus experimentos de la dispersión de los rayos α por láminas delgadas de metal, J. J. Thomson propuso un tipo de estructura de capa de electrones para todos los átomos. Sus modelos de estructuras fueron desarrollados matemáticamente a partir de la Ley de Coulomb de las partículas cargadas y pronto fue conocida como el átomo de *budín de ciruelas*.

Thomson veía todas las cargas positivas de un átomo extendidas uniformemente en una esfera de unos 10^{-8} cm. de diámetro, con los electrones como partículas menores distribuidas en capas en forma parecida a lo mostrado en la fig. 32G. Aun-

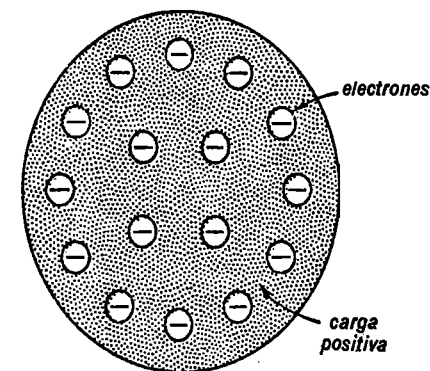


Fig. 32G. Diagrama del modelo atómico de Thomson.

que la fuerza neta ejercida por la esfera con cargas positivas sobre cada electrón está dirigida hacia el centro de la esfera, los electrones se repelen mutuamente y forman anillos.

Se puede obtener una demostración excelente de la tendencia a formar capas como se ve en la fig. 32H. Una cubeta de vidrio de 15 a 20 cm de diámetro se rodea con unas 30 vueltas de alambre aislado

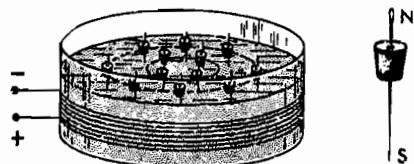


Fig. 32H. Agujas flotantes en un campo magnético demostrando la estructura de capas de electrones en el átomo de Thomson.

de cobre núm. 14. Luego se atraviesan agujas comunes de acero en unos corchos de 8 mm de diámetro y 8 mm de largo, como la de la derecha, y se magnetizan por frotamiento con el polo norte de un fuerte imán de Alnico.

Poniendo agua en el recipiente, y pasando una corriente de 1 a 2 amperios por la bobina, se coloca una sola aguja vertical en el agua. Dejándola libre se moverá hasta el centro donde es más fuerte el campo magnético. Al agregar más agujas, una después de otra, cerca de la orilla del recipiente se producirá la formación de diseños geoméricamente simétricos y de anillos.

Un aumento o disminución de la corriente hará que cualquier diseño que se tenga se achique o extienda, correspondiendo a una mayor o menor carga positiva. La estabilidad de estos anillos influyó indudablemente en la posterior extensión del modelo de órbitas cuantizadas de Bohr y Stoner del átomo de hidrógeno a todos los demás átomos.

32.7 Teoría de Bohr del átomo de hidrógeno. En 1913 Niels Bohr,* propuso una

* Niels Bohr (1885-1962), físico danés, nacido en Copenhague, hijo de Christian Bohr, profesor de Fisiología en la Universidad de Copenhague. Después de obtener su doctorado en Fisiología en dicha universidad, en 1911, estudió durante un año con J. J. Thomson en Cambridge, y otro año con Ernest Rutherford en Manchester, regre-

teoría del átomo de hidrógeno que marcó el principio de una nueva época en la historia de la física. Con su teoría, Bohr dio una explicación satisfactoria de la serie Balmer del hidrógeno (véase la fotografía (f) a colores de la fig. 32C) y, además, Bohr dio un modelo para la estructura de todos los demás átomos.

Partiendo del átomo que debe ser el más sencillo de todos, Bohr supuso que el átomo de hidrógeno, $Z=1$, consiste en un núcleo con una carga positiva, $+e$, y un solo electrón de carga, $-e$, girando alrededor de él en una órbita circular de radio r (véase la fig. 32I). Se puede con-

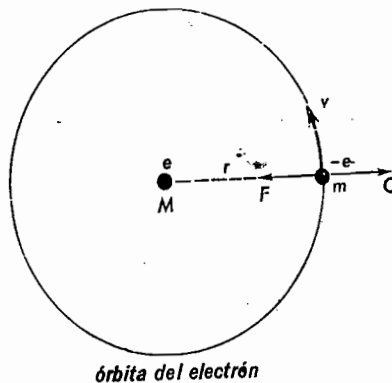


Fig. 32I. Diagrama orbital del átomo de hidrógeno según la teoría de Bohr.

siderar que el núcleo está en reposo porque es 1 840 veces más pesado que el electrón.

Para mantener el electrón en su órbita y evitar que se acerque o se aleje del núcleo siguiendo una espiral, también supuso Bohr que la fuerza centrípeta hacia el interior, E , se debe y es igual a la fuerza

sando a su ciudad natal en 1913, con los resultados de los experimentos de dispersión de Rutherford muy frescos en su mente, desarrolló y publicó su famosa teoría del átomo de hidrógeno. En 1920 Bohr fue nombrado jefe del Instituto de Física Teórica de la Universidad de Copenhague. En 1921 se le confirió la Medalla Hughes de la Sociedad Real y en 1922 el Premio Nobel en Física. Posteriormente fue el físico danés que ha recibido más honores y el padre de una excelente familia. En 1937 propuso la teoría de la gota de agua para el núcleo del átomo.

electrostática E , hacia el núcleo. De la ecuación (8d) tomamos la fuerza centrípeta como mv^2/r , y de la ecuación (25a), la ley de Coulomb, la fuerza electrostática como kee/r^2 . Igualando las dos,

$$m \frac{v^2}{r} = k \frac{ee}{r^2} \quad (32a)$$

En este punto Bohr introduce su segunda hipótesis, la hipótesis cuántica. Supone que el electrón no se puede mover en una órbita estable de cualquier dimensión bajo las condiciones de la ecuación anterior, sino sólo en ciertas órbitas definidas y discretas. Las dimensiones de estas órbitas están determinadas por la ecuación (32a), y por la regla de que la cantidad de movimiento angular mvr es igual a un entero, n , por la constante h dividida entre 2π .

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (32b)$$

En esta ecuación, n es llamado el número cuántico principal y, como sólo puede tener valores de enteros: 1, 2, 3, 4, etc., fija el tamaño de las órbitas permitidas. Ya que n es siempre entero, $h/2\pi$ representa una unidad de cantidad de movimiento angular. Esta cantidad es importante, porque su valor es básico para todo el conocimiento de la estructura atómica.

Para encontrar el radio de estas órbitas circulares de Bohr, se resuelve la ecuación (32b) para el valor de v , luego se eleva al cuadrado y se sustituye en la ecuación (32a) para obtener:

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m e^2 k} \quad (32c)$$

Las órbitas que se ven en la fig. 32J, son calculadas poniendo en esta ecuación los valores conocidos de las constantes e , m , h y k ,

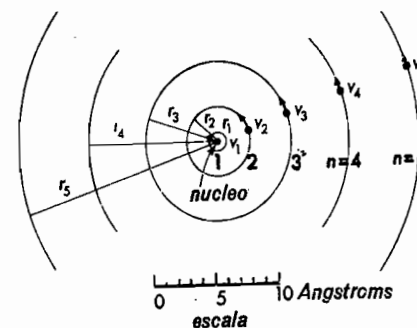


Fig. 32J. Diagrama a escala de las órbitas circulares de Bohr para el hidrógeno.

$$\begin{aligned} e &= -1.60 \times 10^{-19} \text{ culombios,} \\ m &= 9.10 \times 10^{-31} \text{ kilogramos,} \\ h &= 6.62 \times 10^{-34} \text{ julios seg,} \\ k &= 9 \times 10^9 \text{ newtons m}^2/\text{culombios}^2. \end{aligned}$$

La órbita más cercana al núcleo, con $n=1$, tiene un radio $r=0.000\,000\,000\,053\,m$, ó 0.53 \AA , y un diámetro de 1.06 \AA . \AA significa la unidad de longitud llamada *angström* que es muy pequeña.

$$1 \text{ metro} = 10^{10} \text{ angströms}$$

La segunda órbita es cuádruple y la tercera es nueve veces mayor, etc. La constante h se llama la *constante de acción de Planck*.

Con la ecuación (32b) puede determinarse la velocidad del electrón cuando está en cualquier órbita. En la órbita más interior $n=1$, la velocidad v es $1/137$ de la velocidad de la luz. En la segunda órbita la velocidad es sólo la mitad de la anterior, y en la tercera órbita, la tercera parte, etc. Con estas órbitas tan pequeñas y velocidades tan elevadas, el número de revoluciones por segundo resulta muy grande. La frecuencia en la segunda órbita se calcula que es de 10^{15} rev/seg. Esta frecuencia se puede considerar del mismo orden de magnitud que la frecuencia de la vibración de las ondas de luz visible.

Debe hacerse notar que el único electrón en cada átomo de hidrógeno puede

ocupar sólo una órbita en un determinado momento. Si cambia de órbita el electrón, debe de moverse a otra de las órbitas permitidas, y nunca detenerse entre ellas.

32.8 Saltos de los electrones de Bohr. La tercera y última hipótesis de Bohr referente al átomo del hidrógeno, explica la emisión de luz. Bohr estableció que un electrón no emite luz cuando se mueve en una de sus órbitas fijas, sino que sólo lo hace cuando el electrón salta de una órbita a otra, según se indica en la figura 32K. La frecuencia de esta luz, dijo él,

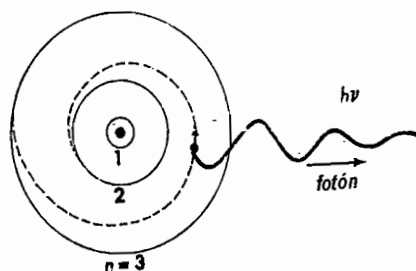


Fig. 32K. Hipótesis cuántica de Bohr, de la radiación de luz producida por un átomo de hidrógeno.

no está determinada por la frecuencia de revoluciones del electrón sino por la diferencia de energía entre la órbita inicial y la final.

$$E' - E'' = h\nu \quad (32d)$$

donde E' es la energía de la órbita inicial, E'' la energía de la órbita final, h la constante de Planck y ν la frecuencia de la luz.

Para ilustrar esto, hagamos que E_1, E_2, E_3, E_4 , etc., representen la energía total del electrón, cuando está en las órbitas $n=1, 2, 3, 4$, etc., respectivamente. Por ejemplo, si el electrón está en la órbita $n=3$, donde su energía es E_3 , y salta a la órbita $n=2$, donde la energía es E_2 , la diferencia de energía $E_3 - E_2$ es emitida por el átomo en una onda luminosa con energía $h\nu$ llamada un fotón. Este es el

origen de las ondas luminosas producidas dentro del átomo.

El éxito de la teoría de Bohr no es atribuible tanto al modelo o imagen mecánica del átomo que acabamos de proponer, como al desarrollo de una ecuación que coincide exactamente con las observaciones experimentales.

32.9 Átomos normales y excitados. Cuando el único electrón del átomo de hidrógeno está en la órbita más cercana al núcleo, $n=1$, se dice que el átomo está en su *estado normal*. Como su nombre lo indica, esta es la condición de la mayoría de los átomos libres de hidrógeno gaseoso, a la presión y temperatura ambiente. Si se lanza una descarga eléctrica a través de un recipiente que contenga gas hidrógeno, los rayos catódicos (electrones) moviéndose a grandes velocidades, chocan con frecuencia con los electrones de los átomos, arrancando completamente algunos de ellos, y lanzando otros a las órbitas permitidas más alejadas del núcleo, $n=2, 3, 4$, etc.

Cuando el electrón se desprende completamente de un átomo, se dice que éste queda ionizado; mientras que cuando es forzado a pasar a otra órbita exterior, se dice que el átomo ha sido excitado. Una vez que se encuentra excitado, el átomo no permanecerá mucho tiempo en este estado, porque el electrón, bajo la atracción del núcleo saltará a una órbita más interior. Al saltar a una órbita más cercana el electrón pierde toda o parte de la energía que había ganado.

Cuando se excita un electrón, no regresa necesariamente hasta la órbita más interior en un solo salto, sino que puede hacerlo en varios saltos sucesivos, emitiendo varias ondas luminosas o cuantos de energía diferentes.

32.10 Esquema de Bohr-Stoner sobre la estructura de los átomos. Bohr y Stoner propusieron una ampliación del modelo orbital del hidrógeno para incluir todos los elementos químicos. Como se ve por los

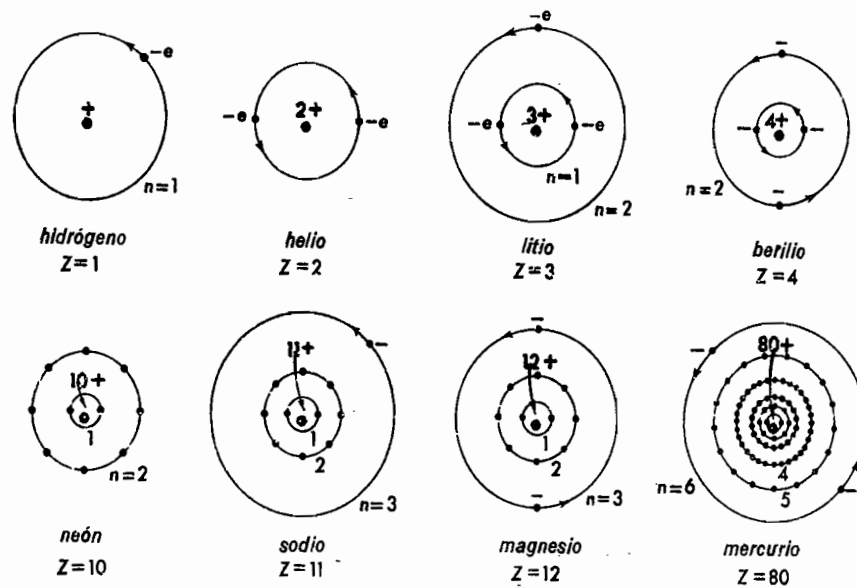


Fig. 32L. Modelos orbitales Bohr-Stoner de átomos ligeros y pesados de la tabla periódica.

ejemplos en la fig. 32L, cada átomo está compuesto de un núcleo con carga positiva y un grupo de electrones alrededor de él.

Aunque el núcleo es una partícula relativamente pequeña, menor de 10^{-12} cm de diámetro, contiene casi toda la masa del átomo, una masa igual al peso atómico en unidades atómicas de masa. La carga positiva que lleva el núcleo es numéricamente igual al número atómico y determina el número de electrones que hay en las órbitas exteriores. Un átomo de helio de número atómico $Z=2$, tiene dos car-

drógeno para $n=1, 2, 3$, etc., y son llamadas capas electrónicas. Siguiendo la tabla atómica de elementos, y empezando con el hidrógeno, se agregan electrones, uno después de otro, completando una capa y luego otra. Una capa se llena sólo cuando contiene un número de electrones dado por $2n^2$. Para ilustrar esto, la primera capa $n=1$ se completa cuando tiene dos electrones, la segunda, $n=2$, cuando tiene ocho electrones. La tercera, $n=3$, cuando tiene 18 electrones, etc.; $2 \times 1^2 = 2$, $2 \times 2^2 = 8$, $2 \times 3^2 = 18$, etcétera.

Número cuántico	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$
Número de electrones	2	8	18	32	50	72

gas positivas en el núcleo y dos electrones exteriores. Un átomo de litio, número atómico $Z=3$, contiene tres cargas positivas en el núcleo y tres electrones en el exterior. Un átomo de mercurio, de número atómico 80, contiene 80 cargas positivas en el núcleo y 80 electrones orbitales.

Las órbitas en que están confinados los electrones, son las órbitas de Bohr del hi-

Entre los elementos más pesados hay varias desviaciones del orden en que se llenan las capas. Aunque estas desviaciones no son importantes desde nuestro punto de vista actual, su naturaleza se muestra con el átomo de mercurio, fig. 32I. Las cuatro capas internas $n=1, 2, 3$ y 4 están completamente llenas con 2, 8, 18 y 32 electrones respectivamente, mientras

que la quinta capa contiene sólo 18 electrones y la sexta, dos. Las razones de estas desviaciones son bien comprendidas actualmente, y representan un índice del comportamiento químico de los elementos pesados.

Es importante hacer notar que, al aumentarse la carga nuclear y agregarse electrones a las capas exteriores, las capas internas disminuyen de tamaño, por la mayor atracción que sufren de parte del núcleo. El resultado de esta retracción es que los elementos más pesados de la tabla periódica, son sólo un poco mayores en diámetro que los elementos ligeros. Los diagramas esquemáticos de la fig. 32L, están dibujados aproximadamente con la misma escala.

La confirmación experimental de estos límites máximos del número de electrones en cada capa, es considerada ahora como uno de los principios más fundamentales de la naturaleza. En 1925 W. Pauli dio la primera explicación teórica completa de este principio de la estructura atómica, y por eso se le menciona comúnmente como el *principio de exclusión de Pauli*.*

32.11 El átomo de sodio. Bohr y Stoner consideraron que las nuevas capas de electrones empiezan a completarse en los metales alcalinos, litio, sodio, potasio, rubidio y cesio, guiándose por el aspecto sencillo de las series de líneas de los espectros producidos por estos elementos. Esto significa que cada átomo alcalino tiene un único electrón más exterior que todos los demás, y en una órbita para él solo. Esto se ilustra con el sodio, de número atómico $Z=11$, en la fig. 32L, y de nuevo en la fig. 32M.

En todos los átomos normales de sodio, el electrón exterior, llamado electrón de valencia, está situado en la órbita $n=3$. Cuando se lanza una descarga eléctrica a través del vapor de sodio, se excitan mu-

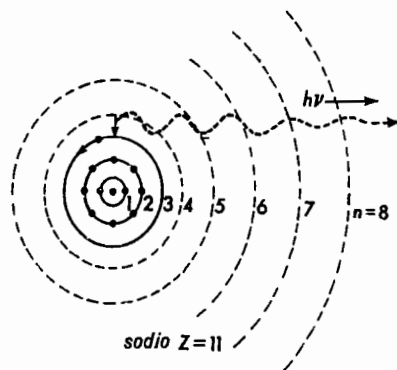


Fig. 32M. Un átomo de sodio con sus órbitas virtuales.

chos átomos y en consecuencia emiten ondas de luz en una forma similar al átomo de hidrógeno ilustrado en la fig. 32K. En cada átomo excitado, el electrón de valencia está en una de las órbitas virtuales exteriores $n=4, 5, 6$, etc. Saltando hacia atrás al estado normal, $n=3$, emite un fotón de frecuencia ν .

El contenido de energía de cada fotón está determinado por la teoría cuántica expresada en la ecuación (32d). La sucesión de saltos de las órbitas exteriores hasta el estado normal, $n=3$, produce una serie de líneas del espectro como se ve en la fig. 32F. El salto de $n=4$ a $n=3$, da lugar a la primera línea de la serie; el salto de $n=5$ a $n=3$, a la segunda línea de la serie, etc.

La absorción de la luz por los átomos de sodio es un proceso inverso del de emisión. Cuando una onda de luz o fotón de la frecuencia apropiada se acerca a un átomo normal de sodio, será absorbido por éste, utilizando esa energía para elevar el electrón exterior de su órbita normal $n=3$ a alguna otra más alejada del núcleo. Éste es un proceso de excitación del átomo producida por absorción de la luz. Al regresar al estado normal, los electrones pueden emitir la luz de nuevo.

32.12 Partículas giratorias atómicas. Los estudios cuidadosos de las líneas espectrales producidas por diferentes clases de áto-

mos llevaron en 1925 a la proposición por dos físicos holandeses, Goudsmit y Uhlenbeck, de que todos los electrones y protones están girando como trompos. Ahora se sabe que, tanto los electrones como los protones, giran en torno a un eje, de modo muy parecido a como gira la Tierra en torno a su eje polar, y que cada uno tiene exactamente la mitad de la unidad de cantidad de movimiento angular, $h/2\pi$.

Cantidad de movimiento angular

$$= \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi} \quad (32e)$$

En la fig. 32N se ve un diagrama esquemático del protón y el electrón giratorios de un átomo de hidrógeno.

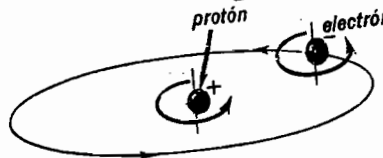


Fig. 32N. Tanto el protón como el electrón giran en torno a un eje que pasa por el centro de cada uno.

32.13 Ondas de los electrones de De Broglie. En 1924, un físico teórico francés, De Broglie, derivó una ecuación pronosticando que todas las partículas atómicas tienen ondas de una longitud definida,

asociadas con ellas. En otras palabras, un haz de electrones o de átomos deben actuar como un tren de ondas de luz o un haz de fotones, bajo condiciones experimentales apropiadas. La longitud de estas ondas, predicha por De Broglie, depende de la masa y velocidad de las partículas, de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (32f)$$

Esta se conoce como la *ecuación de las ondas de De Broglie*. Para un electrón moviéndose a alta velocidad, el denominador es grande y la longitud de onda es corta. En otras palabras, mientras más rápido se mueve un electrón, más corta es la longitud de onda asociada con él.

Para obtener un concepto de las longitudes de onda relativas de electrones que están moviéndose a diferentes velocidades, se han acumulado algunos valores con la ecuación de De Broglie y se dan en la Tabla 32A. Las velocidades están en kilómetros por segundo en la columna 2 y en porcientos de la velocidad de la luz en la columna 3. Los potenciales de la columna 1 son los voltajes necesarios para que la ec. (30c) dé un electrón de cualquiera de las velocidades dadas en las columnas 2 y 3 (ver fig. 30I). Se notará que las

TABLA 32A. LONGITUDES DE ONDA ASOCIADAS CON ELECTRONES QUE SE MUEVEN A DIFERENTES VELOCIDADES CONFORME A LA ECUACIÓN DE LA ONDA DE DE BROGLIE

V (voltaje aplicado)	v (velocidad en km/seg)	$\frac{v}{c}$ (velocidad en porcientos)	λ (longitud de onda en angstroms)
1	590	0.20	12.23
10	1 700	0.62	3.87
100	5 900	1.98	1.22
1 000	29 000	6.26	0.38
10 000	57 000	19.50*	0.12
100 000	160 000	54.80*	0.03
1 000 000	280 000	94.10*	0.01

* Estos valores toman en cuenta el aumento de masa del electrón, debida a la teoría de la relatividad.

* Para un tratamiento más detallado de la estructura atómica, ver *Introduction to Atomic Spectra*, de H. E. White, McGraw-Hill Book Co., Inc.

longitudes de onda de abajo correspondientes aproximadamente a las de los rayos X y los rayos γ , que se tratarán en los capítulos posteriores.

32.14 Ondas de los electrones dentro del átomo. El desarrollo más reciente en la teoría de la estructura del átomo ha probado que no es correcta la imagen de Bohr del átomo con órbitas de electrones bien definidas. La nueva teoría no desecha enteramente la de Bohr, sólo la modifica para afirmar que el electrón no se comporta como una partícula. El electrón se comporta como si estuviera formado de ondas (a veces llamadas ondas de De Broglie) del tipo descrito en las secciones anteriores.

La nueva teoría para el átomo de hidrógeno fue elaborada independientemente por los dos físicos teóricos alemanes, W. Heisenberg y E. Schrödinger, en 1925, y después fue modificada y mejorada por el físico teórico inglés, P. Dirac, en 1928.* Schrödinger usa la idea de las ondas de los electrones de De Broglie y presenta al único electrón del átomo de hidrógeno moviéndose en torno al núcleo como una especie de paquete de ondas. Este paquete de ondas, como se llama, está formado en modo semejante a como se forman y se mantienen las ondas estacionarias en las ondas de sonido.

Para establecer estas ondas estacionarias, según Schrödinger, la longitud del camino de un electrón alrededor del núcleo de hidrógeno debe ser un número entero de longitudes de onda. Ya que la circunferencia es $2\pi r$, podemos escribir, $n\lambda = 2\pi r$. Si sustituimos por λ , la longitud de onda de De Broglie $\lambda = h/mv$, la condición para satisfacer esta nueva teoría es

$$n \frac{h}{mv} = 2\pi r \quad (32g)$$

* Por su contribución a la nueva teoría de la estructura atómica, Heisenberg recibió el Premio Nobel en Física, en el año de 1932, mientras que Schrödinger y Dirac recibieron juntos ese premio un año más tarde.

donde $n = 1, 2, 3$, etc. Ésta es exactamente la condición propuesta por Bohr en su teoría orbital presentada en la ec. (32b), ya que al trasponer la cantidad de movimiento al otro lado de la ecuación nos da $mvr = nh/2\pi$. No es de sorprender, por tanto, que la nueva teoría dé también exactamente la ecuación de Bohr, ecuación (32d), para las longitudes de onda y las frecuencias del espectro del hidrógeno.

Un método de representar el electrón en el átomo es la imagen de una onda electrónica que tenga una longitud considerable para que pueda extenderse en ondas estacionarias. Esto puede ilustrarse esquemáticamente como en la fig. 32O.

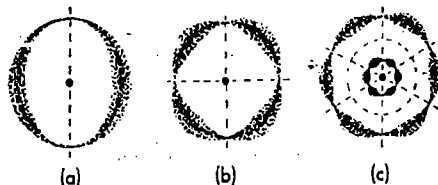


Fig. 32O. Diagrama esquemático de las ondas del electrón orbital dentro de un átomo de hidrógeno.

En la primera figura hay dos nodos radiales; en la segunda, cuatro, y en la tercera, seis, y un nodo esférico. En esta representación no se imagina el electrón como una partícula colocada en cierto punto dentro del átomo, sino como si su masa y carga estuvieran distribuidas simétricamente en el espacio inmediato que rodea al núcleo del átomo. Es interesante señalar que, mientras las órbitas circulares de Bohr estaban confinadas a un plano, el modelo ondulatorio permite la distribución de los electrones en tres dimensiones.

Aun cuando la nueva teoría del átomo de hidrógeno es un perfeccionamiento de la anterior teoría orbital de Bohr y da una explicación más satisfactoria de todos los fenómenos conocidos, es más difícil formarse una imagen mental de cómo puede verse un átomo. De hecho, los físicos teóricos modernos llegan a decir que la pregunta: "¿Qué aspecto tiene un átomo?"

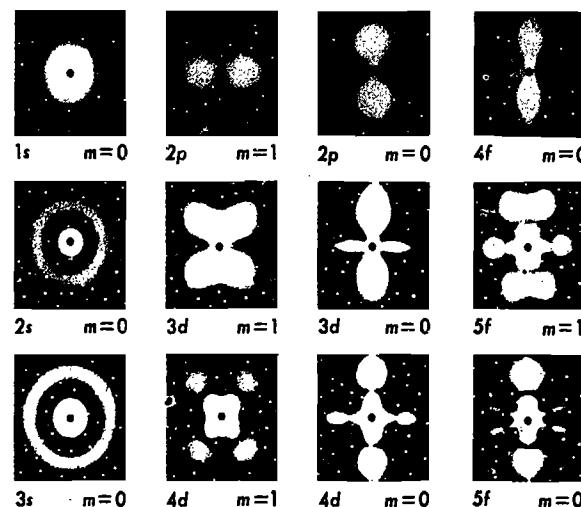


Fig. 32P. Figuras de densidad, representando los estados del único electrón de un átomo de hidrógeno.

no tiene sentido; y mucho menos tiene una respuesta. Aun así, hay otros que sostienen que sólo se han entendido aquellas cosas que se pueden imaginar y que todos los procesos mentales de pensamiento están formados en términos de cosas que registramos por la vista o el tacto. Por esta razón se da con frecuencia una interpretación de la teoría y sus ecuaciones resultantes diciendo que la amplitud de las ondas de los electrones dentro de un átomo representan la distribución de la carga eléctrica y la masa. En los nodos se supone que hay poco o nada de carga, mientras que en los vientres hay una cantidad máxima de carga.

En la fig. 32P se muestran fotografías de representaciones de algunos de los estados posibles del único electrón del hidrógeno. No son fotos de átomos reales sino sólo representaciones. Se hacen fotografiando un aparato mecánico de diseño especial. Donde es grande la carga electrónica, la figura es blanca; y donde es prácticamente cero, en los nodos, es oscura. La distribución en tres dimensiones puede visualizarse imaginando a cada figura girando en torno a un eje vertical, ilustrado por la línea blanca de la segunda figura.

Esta figura en particular tendría en tres dimensiones una forma semejante a un anillo de humo.

32.15 La nueva imagen atómica. Aun cuando el átomo de Bohr ha sido reemplazado por el modelo más satisfactorio de un núcleo rodeado de ondas de los electrones, se acostumbra todavía, sólo por conveniencia, hablar de las capas y órbitas de electrones. La razón de esto es que hay

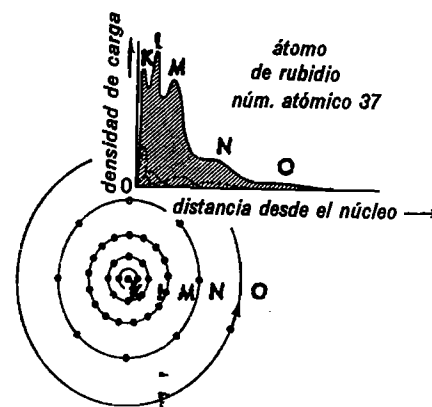


Fig. 32Q. Diagramas comparando las teorías nueva y vieja de la estructura del átomo, conforme al modelo de la mecánica ondulatoria y al de Bohr-Stoner.

una cercana analogía entre los dos modelos. Cuando se extiende el esquema Bohr-Stoner, del desarrollo de los elementos, a la nueva teoría de las ondas de los electrones, se encuentra que los electrones distribuyen su carga en tal forma que se produce algo análogo a las capas.

Esto se ilustra con la gráfica del átomo de rubidio, número atómico 37, en la figura 32Q. El área sombreada representa la distribución de la carga de 37 electrones según la nueva teoría y el modelo orbital inferior representa las capas de elec-

trones en la teoría anterior. El nuevo modelo es representado por la gráfica porque es esféricamente simétrico en el espacio, mientras que el modelo antiguo se representa por órbitas por estar confinado en un plano. Partiendo del núcleo hacia el exterior se ve que la carga pasa por varios máximos a distancias que corresponden aproximadamente a las capas discretas *K*, *L*, *M*, *N* y *O* del modelo orbital. En otras palabras, el nuevo átomo tiene también una estructura que se parece a las antiguas capas.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Se calienta lentamente una pieza de metal hasta llegar al rojo blanco. ¿Cuál es la secuencia de colores que se ve: a) viéndolo el metal directamente, y b) viéndolo a través de un prisma?

2. ¿Qué es un espectro? ¿Cuáles son los nombres de las cuatro clases de espectros?

3. ¿Qué es un espectro continuo de emisión? ¿Cómo se produce y cómo se detecta?

4. ¿De qué tipo de fuente luminosa se obtiene un espectro de líneas de emisión?

5. ¿Qué son las líneas del espectro? ¿Por qué tienen forma de líneas?

6. Describir brevemente la luz ultravioleta y la luz infrarroja. ¿Cómo se producen y se detectan? ¿Cuáles son las propiedades de estas radiaciones?

7. Describir brevemente cómo se produce un espectro continuo de absorción. Hacer un diagrama mostrando los elementos principales del aparato necesario y el espectro resultante.

8. ¿Cómo haríamos para producir un espectro de líneas de absorción? Hacer un diagrama y dar explicaciones.

9. ¿Cuál fue la forma del átomo de Thomson? ¿Dónde colocó las cargas positivas? ¿Dónde colocó las cargas negativas?

10. Expresar claramente las tres hipótesis hechas por Bohr al formular su teoría del

átomo de hidrógeno. Hacer un diagrama separado para cada hipótesis rotulando correctamente cada elemento esencial.

11. Explicar brevemente qué se entiende por: a) un átomo normal; b) un átomo excitado, y c) un átomo ionizado.

12. ¿Cuál es el esquema Bohr-Stoner de desarrollo de los átomos? ¿En qué difiere del átomo de Thomson?

13. ¿Cuántos electrones puede tener cada capa? ¿Cuál es la fórmula general?

14. Hacer un diagrama de un átomo de cinc (número atómico, 30) de acuerdo con el esquema de desarrollo de la estructura de los átomos de Bohr-Stoner. Presentar todos los átomos en su órbita adecuada.

15. Hacer un diagrama de un átomo de arsénico (número atómico, 33) de acuerdo con el desarrollo de la estructura de los átomos de Bohr-Stoner. Presentar todos los electrones en su órbita adecuada.

16. ¿Cuál es el número cuántico principal *N*? ¿Cuál es el valor menor que puede tener este número cuántico? ¿Cuál es el valor mayor posible?

17. Si la órbita más interna de un átomo de hidrógeno tiene un diámetro de 1.06 Å, ¿cuál es el diámetro de la décima órbita? (Resp. 106 Å.)

18. ¿Cuál es el diámetro de la décima quinta órbita de un átomo de hidrógeno si

el diámetro de la órbita más interna es de 1.06 Å?

¿cuál es su frecuencia de revolución? (Respuesta. 4.26×10^{13} rev/seg.)

19. Calcular la rapidez del electrón de un átomo de hidrógeno si está en la quinta órbita circular. (Resp. 4.38×10^5 m/seg.)

20. Calcular la rapidez del electrón de un átomo de hidrógeno si está en la decimoquinta órbita.

21. Si el diámetro de la quinta órbita circular del átomo de hidrógeno es 26.5 Å,

22. Si el único electrón de un átomo de hidrógeno está en la novena órbita circular de 85.9 Å de diámetro, ¿cuál es su frecuencia de revolución?

23. A partir de las ecs. (32a) y (32b) deducir la ec. (32c) del radio de las órbitas circulares de Bohr.

RAYOS X Y EL EFECTO FOTOELECTRICO

Uno de los episodios más interesantes en la historia de la ciencia moderna empezó con el descubrimiento accidental de los rayos X por Wilhelm Röntgen * en 1895. Mientras estudiaba la fluorescencia verde de una descarga eléctrica en un tubo de Crookes, observó Röntgen la brillante fluorescencia de algunos cristales cercanos de cianuro de platino y bario. Aunque el tubo de descarga estaba en un cuarto oscuro y rodeado completamente con papel negro para evitar la fuga de luz visible, una pantalla distante cubierta con cristales, adquiriría una brillante fluorescencia cuando se producían las descargas en el tubo de Crookes. Por ello Röntgen pensó que el tubo de descarga estaba originando *alguna clase de rayos invisibles*, pero penetrantes, de un tipo desconocido. Él los llamó rayos X, indicando con la X una incógnita, como se hace frecuentemente en álgebra.

En la corta serie de experimentos que siguieron a su descubrimiento, Röntgen encontró que los rayos desconocidos venían

* Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923). Nació en Lennep el 27 de marzo de 1845 y recibió su educación en Holanda y Suiza. Su carrera científica empezó a los 25 años, cuando entró como ayudante del laboratorio de física en Wurzburg, Alemania. Después de una época de profesorado que se prolongó por 25 años y lo llevó a la Universidad de Estrasburgo, luego a Hohenheim y de nuevo a Estrasburgo, después a Giessen y finalmente de regreso a Wurzburg, descubrió los rayos X en su laboratorio en 1895. Por este descubrimiento recibió la medalla Rumford de la Real Sociedad en 1896 y el primer Premio Nobel en Física en 1901. Röntgen también realizó investigaciones sobre la luz, el calor y la elasticidad, pero ninguno de estos trabajos es comparable con su descubrimiento de los rayos X.

de las paredes de vidrio del tubo, y en particular de la región donde el vidrio recibía la parte más intensa del haz de rayos catódicos. Fue tan grande la importancia de este descubrimiento que unas cuantas semanas después del anuncio de Röntgen, los rayos X ya se estaban usando como auxiliares en operaciones quirúrgicas en Viena. Esto, junto con otras aplicaciones y usos prácticos de este descubrimiento científico, es un buen ejemplo del papel desempeñado por la ciencia moderna en el rápido progreso de la civilización.

33.1 Tubos de rayos X. El tubo de Crookes con que Röntgen hizo su descubrimiento, tiene muy poco parecido con el moderno tubo de rayos X. Era parecido al tubo indicado en la fig. 30C. Se hicieron varias mejoras notables en el diseño del tubo en un período muy corto después del descubrimiento de Röntgen. La primera contribución importante en este sentido, vino inmediatamente después del descubrimiento, y es que los rayos X son producidos por la detención brusca de los electrones.

En los tubos primitivos de rayos X los electrones del cátodo no chocaban con las paredes del vidrio, sino que eran dirigidos hacia el ánodo usado como blanco, como se ve en la fig. 33A. Curvando el cátodo como un espejo cóncavo, se pudieron enfocar los electrones en un punto del blanco, haciendo de él una fuente localizada de rayos X. Irradiando en todas las direcciones posibles estos rayos Röntgen, como también son llamados, no encuentran difi-

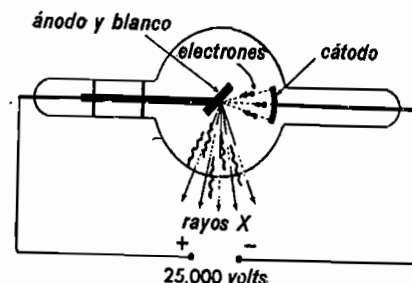


Fig. 33A. Un tubo primitivo de rayos X.

cultad para atravesar las paredes de vidrio del tubo.

El perfeccionamiento mayor en el diseño de los tubos de rayos X fue hecho por Coolidge, físico norteamericano, en 1913. En el tubo Coolidge que actualmente se fabrica en escala comercial (véase la figura 33B), se coloca un filamento de wol-

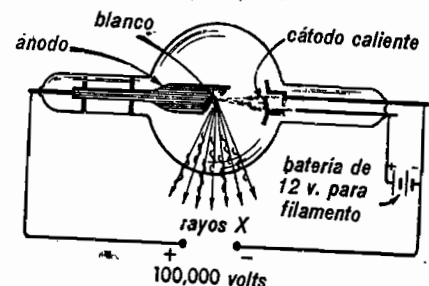


Fig. 33B. Diagrama de un tubo Coolidge de rayos X de cátodo incandescente.

framio en el centro del cátodo y se calienta hasta la incandescencia con un acumulador o transformador de bajo voltaje. Este filamento, que es un emisor copioso de electrones, produce en el blanco una fuente de rayos X mucho más intensa que las que se podían lograr antes con el cátodo frío. Con el tremendo bombardeo del blanco por tantos electrones, la mayoría de los metales se funden. Para vencer esta dificultad, se incrusta en la cara de un ánodo sólido de cobre un metal de punto de fusión elevado, como el wolframio o el molibdeno, para usarlo como blanco. Siendo buen conductor térmico, el cobre ayuda a disipar el calor.

Las primeras fuentes de alto voltaje aplicadas al ánodo y al cátodo de los tubos

de rayos X, eran bobinas de inducción de varias formas. Aunque algunas de estas fuentes todavía se usan, han sido reemplazadas casi totalmente por un transformador de alta tensión más eficiente. La fuerza electromotriz generada por estos transformadores, varía entre cincuenta mil y dos millones de voltios. La fuerza electromotriz usada normalmente para trabajos quirúrgicos es de unos cien mil voltios, mientras que, para el tratamiento de enfermedades, se emplean tensiones más elevadas. La fuerza electromotriz alterna de alto voltaje producida por un transformador, no se aplica directamente al tubo de rayos X, sino que primero se convierte en corriente continua por medio de tubos rectificadores.

33.2 Penetración de los rayos X. Hay cuatro propiedades importantes y útiles de los rayos X que son su capacidad para: 1) penetrar la materia sólida; 2) hacer que ciertos compuestos químicos se vuelvan fluorescentes; 3) ionizar átomos, y 4) impresionar las placas fotográficas. La penetración de los rayos X depende de dos factores: primero, del voltaje aplicado entre el ánodo y el cátodo del tubo de rayos X y segundo, de la densidad de la sustancia a través de la cual deben viajar los rayos. A mayor tensión aplicada al tubo, mayor es la penetración. Los rayos X de gran poder de penetración son llamados rayos duros, mientras que aquellos que tienen poco poder de penetración, son llamados rayos X blandos.

La relación entre la densidad y la penetración se puede ilustrar en varias formas. Cuando pasan rayos X a través de una placa de madera que contiene clavos, o de una bolsa de piel cerrada que contenga monedas, se puede formar y observar en una pantalla fluorescente una imagen clara y bien definida de los clavos o las monedas. El dispositivo experimental es el mismo que se ve en la fig. 33C. Lo que permite que se obtengan fotografías de los huesos cuando pasan rayos X a través de la mano o de cualquier parte del

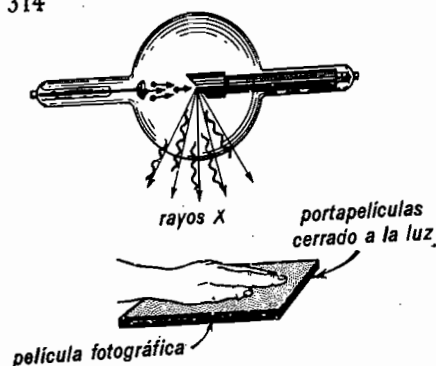


Fig. 33C. Toma de radiografías de los huesos de la mano.

cuerpo, es la diferencia de penetración en la carne y en los huesos. Materiales como el papel, la madera, la carne, etc., compuestos principalmente de elementos químicos ligeros, de los que inicia la tabla periódica, son rápidamente atravesados por los rayos X. En otras palabras, son malos absorbentes de los rayos X. En los materiales como el latón, acero, hueso, oro, etc., compuestos parcialmente de elementos pesados, de los que están más adelante o cerca del final de la tabla periódica, la penetración de los rayos X es muy redu-

cida. Por tanto, los elementos pesados o las sustancias densas, son buenos absorbentes.

Los huesos del cuerpo tienen grandes cantidades de calcio, y son relativamente buenos absorbentes de los rayos X, mientras que la carne, compuesta principalmente de los elementos más ligeros (hidrógeno, oxígeno, carbono y nitrógeno) los absorbe poco. Esto explica la apariencia general de las radiografías. Las fotografías de rayos X, o radiografías como las de la fig. 33D, son semejantes a siluetas producidas por los objetos que se están fotografiando. El punto focal del blanco de los rayos X que está siendo bombardeado por electrones de gran velocidad, actúa como una *fente puntiforme de rayos*. Éstos se dispersan en línea recta, como se ve en la fig. 33C. Al pasar a través de la mano hasta la placa fotográfica, los huesos absorben más rayos X que la carne. La sombra proyectada por los huesos resulta tener muy pocos rayos X y se revela en tono claro en la película fotográfica. Donde sólo atraviesan la carne, los rayos X pasan hasta la película fotográfica que se revela en negro. Por tanto, los huesos apa-

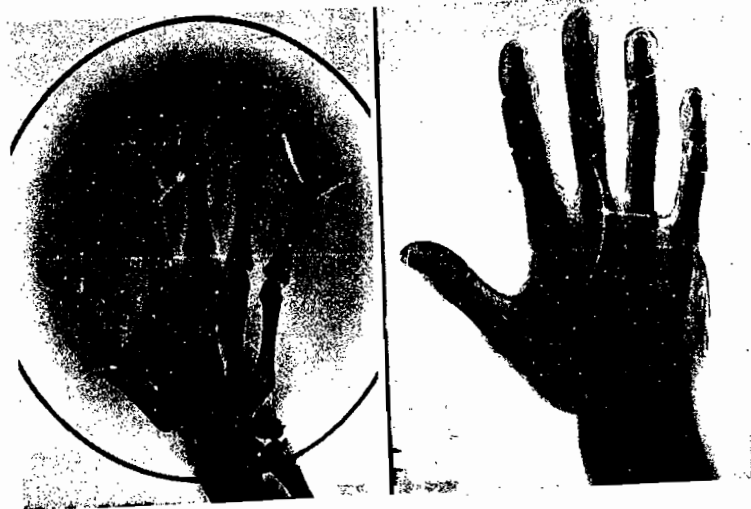


Fig. 33D. Fotografías con rayos X de los huesos de la mano: (a) con la mano en agua; (b) con ungüento de óxido de plomo recubriendo la mano. (Cortesía del Laboratorio Stamford de Investigación, American Cyanamid Co.)

recen en blanco contra un fondo más oscuro. Si esta *película negativa*, como es llamada, se imprime en papel, como en la fig. 33D, resulta una *positiva*, con los huesos en negro.

Si se coloca la película fotográfica más lejos de la mano, la sombra producida será más grande y menos definida. Las mejores imágenes se obtienen colocando la película lo más cerca posible del objeto que se va a fotografiar. Siempre que se va a impresionar una película para tomar una imagen con rayos X, se expone dentro de un sobre de papel negro, o de una caja delgada de aluminio. Esto evita que la luz visible llegue a la película; pero permite que los rayos X penetren a través de la envoltura.

33.3 Poder de ionización. Al pasar los rayos X a través de materia sólida, líquida o gaseosa, se encuentra que *ioniza* a los átomos y a las moléculas. Esto se puede demostrar cargando un electroscopio de hojas de oro, ya sea con carga positiva o negativa y colocándole de tres o cinco metros de distancia de un tubo de rayos X. Cuando se enciende el tubo de rayos X (véase la fig. 33E), las hojas de oro bajan, indicando que se han descargado.

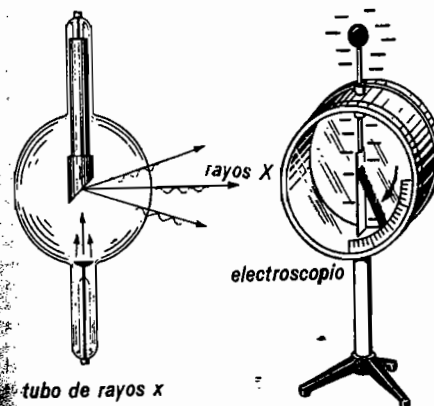


Fig. 33E. Descarga del electroscopio con rayos X. Esto demuestra su poder de ionización.

La explicación de este experimento es la siguiente: Los rayos X que pasan a través del electroscopio, ionizan el aire quitando electrones a muchas de las moléculas de oxígeno y nitrógeno. Al quedar estas moléculas con carga positiva, los electrones liberados se mueven libremente hasta que son recogidos por otras moléculas neutras, a las que comunican su carga negativa. El paso de los rayos X a través de la materia produce, por tanto, *unos iones cargados positivamente y otros con carga negativa*. Si el electroscopio tiene carga negativa, atrae a los iones positivos hacia sus hojas de oro, neutralizando su carga y rechaza los iones negativos hacia las paredes conectadas a tierra, donde también se neutralizan. Si el electroscopio tiene carga positiva, atrae hacia él los iones negativos, neutralizando su carga nuevamente. Los iones positivos, en este caso, son rechazados hacia las paredes. En los dos casos, ya esté el electroscopio cargado positiva o negativamente, las hojas de oro bajan indicando que se descargan.

La ionización de las moléculas y átomos de una sustancia, es lo que limita el poder de penetración de los rayos X. Los elementos pesados contienen más electrones que los elementos ligeros y oponen más electrones en el camino de los rayos X. La atenuación producida por una hoja delgada de plomo, por ejemplo, equivale a la de una hoja de aluminio varias veces más gruesa. Los átomos de plomo contienen 82 electrones cada uno, mientras que los de aluminio sólo contienen 13.

33.4 Aplicaciones prácticas. En las primeras semanas que siguieron al descubrimiento de los rayos X por Röntgen, los editores de periódicos científicos recibieron informes de todo el mundo sugiriéndoles cómo podrían usarse los rayos recién descubiertos para fines prácticos. Algunos ejemplos de estas primeras aplicaciones fueron: 1) la localización de una bala en la pierna de un paciente; 2) la observación fotográfica de la curación de un hueso roto; 3) la localización del contrabando

en equipajes; 4) la diferenciación de gemas artificiales y reales; 5) la localización de perlas en ostras, y 6) el examen del contenido de los paquetes postales. En 1897 el doctor Morton exhibió en Nueva York una fotografía con rayos X del esqueleto completo de una persona viva y enteramente vestida.

Los efectos biológicos resultaron importantes cuando se encontró que los rayos X mataban algunos tejidos animales más rápidamente que otros. Esto los convierte en medio para el tratamiento de ciertas enfermedades de la piel. Su aplicación particular a la terapia de las formas bien conocidas de crecimientos cancerosos en los animales y en los seres humanos, ha producido resultados sorprendentes y frecuentes curaciones. Cuando es tratado un cáncer interno mandando un haz de rayos X a través del cuerpo, son destruidos lentamente tanto los tejidos cancerosos como los tejidos normales. Es posible lograr curaciones gracias a que los tejidos normales se desarrollan de nuevo con mayor rapidez que los tejidos cancerosos. Las radiaciones periódicas permiten a los tejidos normales reconstruirse en los intervalos.

Aunque sólo pueden tratarse con éxito ciertas enfermedades mediante estos rayos, se sigue efectuando una gran investigación con los rayos X de voltajes extremadamente altos, esperando descubrir nuevos y más efectivos auxiliares médicos. Se cree generalmente que la destrucción del tejido celular producida por los rayos X, se debe principalmente a la ionización de las moléculas dentro de las células.

No se puede sobrestimar la importancia de los rayos X en algunos aspectos del campo de la ingeniería. Esta importancia se puede apreciar al considerar que las piezas metálicas de fundición y las uniones soldadas, contiene a veces defectos y burbujas (sopladuras) internas, que sólo así pueden localizarse. Muchas de estas partes metálicas son examinadas con rayos X antes de usarlas, para evitar los resultados desastrosos que pueden ocurrir al emplearse

piezas o uniones defectuosas en un puente o edificio.

33.5 Los rayos X son ondas. Poco después del descubrimiento de los rayos X por Röntgen, se produjo en los círculos científicos una división en dos escuelas de opinión respecto a la naturaleza de estos rayos penetrantes. Una escuela sostenía la creencia de que los rayos X eran partículas en movimiento a gran velocidad como los rayos catódicos, pero más penetrantes que ellos, y la otra sostenía que eran ondas electromagnéticas de frecuencia extremadamente elevada. Aunque se efectuaron muchos experimentos para probar estas dos hipótesis, pasaron varios años antes de que se comprobara la teoría ondulatoria.

El experimento decisivo vino en 1912 cuando von Laue* sugirió a sus colegas W. Friedrich y P. Knipping que trataran de difractar los rayos X pasándolos a través de un cristal delgado. Creyendo que la estructura ultramicroscópica de un cristal es un ordenamiento tridimensional de átomos regularmente espaciados, Von Laue pensó que las capas de átomos igualmente separadas, funcionarían como espejos y reflejarían los rayos en diferentes direcciones.

En la fig. 33F se ve un diagrama del experimento tal como fue efectuado. Los rayos X, que vienen de un tubo de rayos X de cátodo frío, son limitados a un haz estrecho de rayos al pasar por dos aberturas perforadas en las dos pantallas de plomo L_1 y L_2 , y luego atraviesan un

* Max von Laue (1879-1960). Nacido cerca de Coblenza, Alemania, en 1879, el joven Max se educó en las universidades alemanas de Estrasburgo, Göttingen y Munich. Después vino su trabajo de profesor y de investigador, que lo llevaron a las Universidades de Munich, Zurich, Frankfurt del Main y finalmente a Berlín. Estando interesado en la física teórica, su primer interés se limitó a algunos problemas de la teoría de la relatividad de Einstein y de la teoría cuántica de Bohr sobre la estructura atómica. Sin embargo, su principal contribución a la física fue el planteamiento y la dirección de los experimentos que llevaron a descubrir la difracción de los rayos X por los cristales. Por este trabajo, que comprobó la naturaleza ondulatoria de los rayos X, recibió el Premio Nobel en 1914.

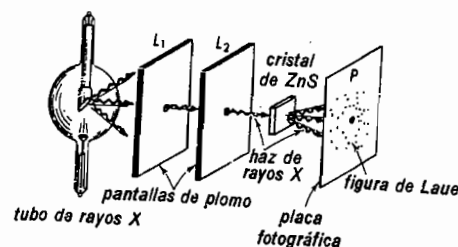


Fig. 33F. Demostración experimental de la naturaleza ondulatoria de los rayos X. Se fotografía una figura de Laue al difractarse los rayos X en los átomos de un cristal.

cristal delgado para llegar a una placa fotográfica P. Además del haz central, la mayor parte del cual sigue una línea recta para producir un círculo ennegrecido en el centro de la película, hay otros muchos haces, más débiles, que salen en diferentes direcciones para impresionar otros puntos en la misma película. La figura de puntos obtenida en esta forma, resulta siempre bastante simétrica, y se la llama *figura de Laue*.

En la fig. 33G se reproducen dos fotografías de Laue, obtenidas con monocristales.

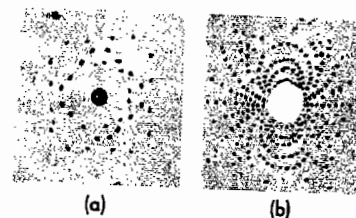


Fig. 33G. Figuras de difracción de rayos X por cristales de: (a) sulfuro de cinc (cristal cúbico) y (b) de azúcar (estructura cristalina compleja).

El número pequeño de puntos en (a), indica la estructura cristalina relativamente simple de sulfuro de cinc, ZnS, y el gran número de puntos en (b), significa una estructura cristalina bastante compleja en el azúcar, $C_{12}H_{22}O_{11}$. Cuando se tomó la fotografía con el azúcar, se cubrió el haz central mediante un pequeño disco de plomo colocado enfrente de la película, para evitar el excesivo ennegrecimiento.

Las figuras de Laue, sencillas, proceden generalmente de estructuras cristalinas simples. La sal común es un ejemplo de cristal sencillo que, como se ve en la figura 10F(a), contiene átomos de sodio (Na) y átomos de cloro (Cl) en números iguales y ordenados en una estructura cúbica tridimensional. La fig. 33H es la sección

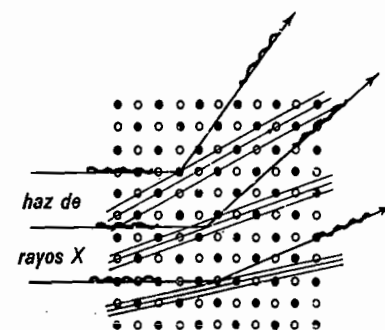


Fig. 33H. Reflexión de los rayos X en distintos planos atómicos de un retículo cristalino cúbico.

transversal de uno de estos cristales presentando los átomos alternados en dos de las tres direcciones. En este arreglo bidimensional se muestra el origen de los diferentes puntos de una figura de Laue.

Cada punto se produce por la reflexión de los rayos X incidentes en alguno de los planos paralelos del cristal, de los cuales se señalan tres mediante grupos de líneas paralelas. Los rayos obedecen siempre la ley de la reflexión (el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión). Aunque los planos reflectores que se ven en el diagrama son todos perpendiculares al plano de la página, hay muchos otros planos en la estructura tridimensional que reflejan rayos en otras direcciones.

El éxito del experimento de Laue comprueba que eran correctos los dos postulados: 1) los rayos X son rayos de luz de longitud de onda muy corta, y 2) los átomos de un cristal están ordenados en una a otra en el interior del átomo. Cuando estructura regular tridimensional. Éstos son los resultados por los cuales Von Laue ganó el Premio Nobel de Física en 1914.

Como resultado inmediato del experimento de Laue, se abrieron dos nuevos e importantes campos de la física experimental: 1) el estudio y medida de la longitud de onda de los rayos X, y 2) el estudio de la estructura de los cristales por su acción sobre los rayos X.

Mientras más corta es la longitud de onda de los rayos X decimos que *son más duros* y mayor es su poder de penetración.

33.6 El origen de los rayos X. Los rayos X, igual que la luz visible, se originan en el salto de un electrón de una órbita a otra en el interior del átomo. Cuando chocan contra el blanco, los electrones de gran velocidad que vienen del cátodo de un tubo de rayos X, ionizan muchos de los átomos que forman la capa superficial del metal.

Debido a sus velocidades tan altas (cerca de la décima parte de la velocidad de la luz), los electrones penetran en los átomos y desprenden por impacto un electrón de las capas interiores. En la fig. 33I se

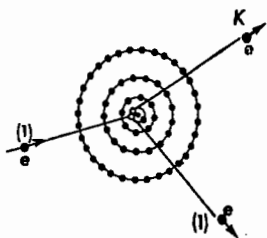


Fig. 33I. Ionización de un átomo por un electrón de gran velocidad.

ve cuando está siendo desprendido un átomo de la capa K. La designación K, L, M, N, O, P, etc., de las diferentes capas de electrones se originó con la espectroscopia de rayos X y es idéntica a los números cuánticos $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6$, etc. Cuando falta un electrón de la capa más profunda, K, salta al lugar vacío un electrón cercano de la siguiente capa, emitiendo simultáneamente un fotón de energía $h\nu$. Vemos por lo tanto que se produce

luz cuando un electrón salta entre ciertas órbitas exteriores de un átomo (ver figura 32M), y los rayos X se producen cuando un electrón salta entre capas interiores, ver fig. 33J. Estos rayos X que se

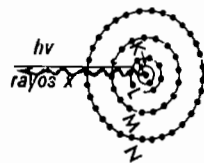


Fig. 33J. Salto de un electrón interior con emisión simultánea de un rayo X.

desprenden de millones de átomos producen el efecto descrito antes.

Ya que la capa L tiene ahora un electrón de menos, puede saltar un electrón M la hueco de la capa L, con la consecuente emisión de otro rayo X, pero de diferente frecuencia. Esta serie de saltos continúa hasta que se llega a la capa exterior, donde el salto de un electrón produce luz visible. Vemos así que un solo átomo puede emitir rayos X de diferentes longitudes de onda.

En la fig. 33K se ve otro proceso que produce la emisión de un fotón de rayos X. Estas radiaciones, llamadas de frenado (Bremsstrahlung), se deben a la desviación y enfriamiento de los electrones de gran velocidad cuando pasan cerca del

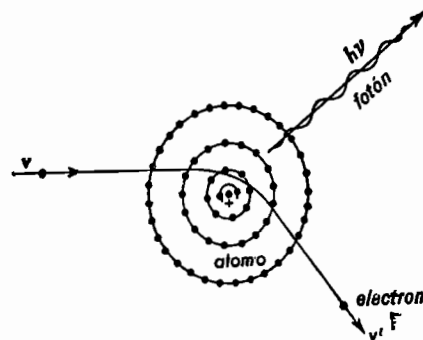


Fig. 33K. Producción de un fotón por un electrón a gran velocidad, que pasa cerca del núcleo en el interior del átomo. (Bremsstrahlung.)

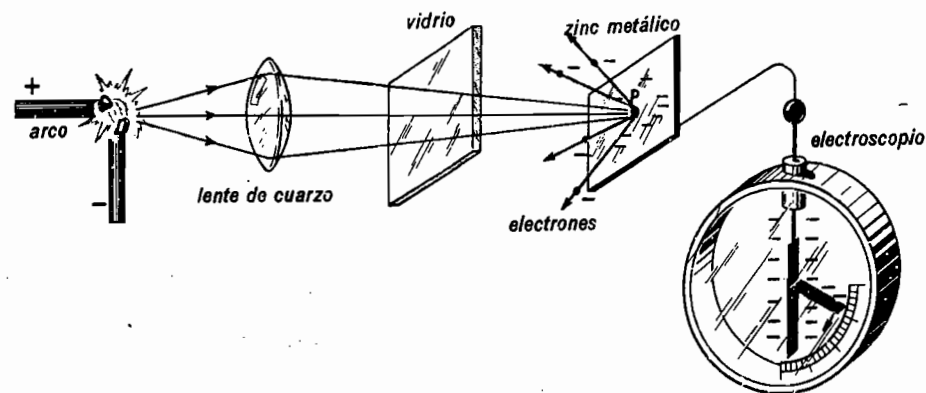


Fig. 33L. Montaje experimental para demostrar el efecto fotoeléctrico. Cuando se inserta la placa de vidrio, se detiene el efecto.

núcleo de los átomos dentro del blanco del tubo de rayos X. Al pasar a través del átomo, el electrón es atraído por la carga positiva del núcleo y, por tanto, es desviado de su camino.

Durante la desviación del electrón en el potente campo eléctrico del núcleo, se emite una onda de energía luminosa $h\nu$. Ya que se tiene que cumplir en este caso con la ley de la conservación de la cantidad de movimiento, el electrón se desvía hacia un lado del átomo y el fotón se desprende saliendo por el otro lado.

Se ha encontrado una relación muy simple entre el alto voltaje V aplicado para acelerar los electrones en un tubo de rayos X y la mayor frecuencia $\nu_{\text{máx}}$ de rayos X emitidos como radiación de frenado. Esta relación es

$$Ve = h\nu_{\text{máx}} \quad (33a)$$

33.7 El efecto fotoeléctrico. En la figura 33L se demuestra el efecto fotoeléctrico. La luz de un arco de carbón se enfoca mediante una lente de cuarzo sobre una placa de zinc metálico recién pulido. Cuando está la placa cargada negativamente y se enciende la luz, baja lentamente la hoja de oro del electroscopio acopla-

do; se baja porque los electrones, bajo la acción de la luz, abandonan la placa de zinc en el punto iluminado, P. Cuando la placa está cargada positivamente, no baja la hoja de oro, probando que la placa retiene su carga. Se observa el mismo efecto de no descargarse cuando la placa de zinc está cargada negativamente y se inserta una placa de vidrio como se ve en la figura. Cuando se quita el vidrio caen de nuevo las hojas de oro. Ya que el vidrio transmite la luz visible y la infrarroja pero no la ultravioleta, se llega a la conclusión de que los electrones sólo son liberados por esa luz. Esto es cierto, en general, para casi todos los metales conocidos.

Aunque estos electrones son las mismas partículas cargadas negativamente que constituyen los rayos catódicos, son llamados *fotodectrones* por ser liberados por medio de la luz.

Algunos elementos —los metales alcalinos, litio, sodio, potasio, rubidio y cesio— son excepciones a esta regla, pues emiten fotodectrones cuando les cae luz visible. Los *metales alcalinos* se usan frecuentemente en la manufactura de celdas fotoeléctricas por esta razón.

33.8 La celda fotoeléctrica. Las celdas fotoeléctricas se hacen generalmente depo-

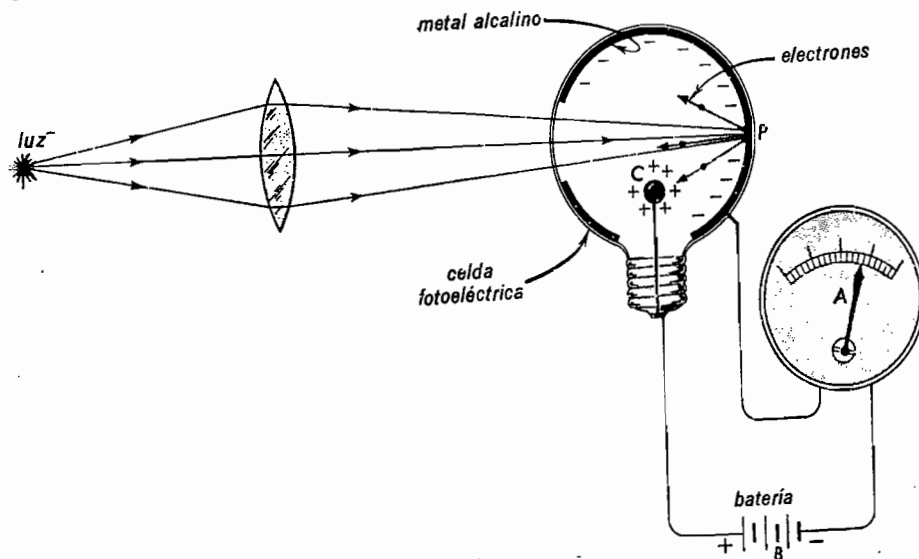


Fig. 33M. Diagrama de una celda fotoeléctrica mostrando el haz de luz y las conexiones eléctricas necesarias para su operación.

sitando una capa de un metal alcalino en la superficie interior de un pequeño tubo al vacío. (Ver la fig. 33M.) La celda se hace de cuarzo si va a operar con luz ultravioleta y con vidrio común si va a usarse con luz visible. La celda debe estar a un completo vacío ya que el oxígeno contenido en el aire se combinaría con la capa activa de metal, contaminando su superficie y haciéndolo insensible a la luz visible. Siempre se deja limpia una pequeña sección de la celda para servir de ventana para la entrada de luz. Los fotoelectrones al llegar a la superficie del metal son atraídos y recogidos por el electrodo C, cargado positivamente. La carga negativa de la película metálica y la carga positiva del colector central se mantienen a un potencial constante con la batería B.

El haz de luz que entra por la ventana de una celda fotoeléctrica actúa con un interruptor que completa un circuito eléctrico. Cuando choca la luz con el metal P, hay un flujo de electrones hacia el colector C, haciendo que fluya una corriente por el circuito. Esta corriente puede ser medida por un amperímetro en A. Si au-

menta la intensidad de la luz, aumenta el número de fotoelectrones y, por tanto, sube la corriente. Cuando se apaga la luz, la acción fotoeléctrica cesa y se detiene la corriente. Si la película metálica está cargada positivamente, la celda resulta insensible a la luz, ya que los electrones que intentan dejar la placa son retenidos por atracción electrostática. Todos estos factores son fácilmente demostrados con un circuito eléctrico simple como el presentado en la figura.

33.9 Ecuación fotoeléctrica de Einstein. Siguiendo una idea anterior de Planck, de que las ondas de luz consisten en pequeños paquetes de energía llamados *fonones* o *cuantos*, Einstein propuso una explicación del efecto fotoeléctrico desde 1905. Sus ideas se expresan en una relación simple, una ecuación algebraica, destinada a ser famosa en la historia de la física. Se han conferido dos premios Nobel, uno a Einstein en 1921 y otro a Millikan en 1923, por esta ecuación fotoeléctrica.

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 \quad (33b)$$

El primer término $h\nu$ representa la energía total contenida en un solo cuanto de luz incidente sobre la superficie metálica, como se ve en la fig. 33N. La letra h es la

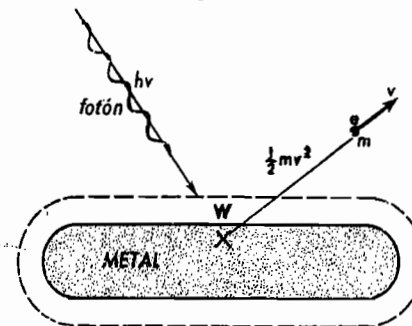


Fig. 33N. Un cuanto de luz (fotón) de energía $h\nu$, incidiendo en una superficie metálica, desprende un electrón con una velocidad v , dada por la ecuación de Einstein.

constante de acción de Planck que, como vimos en la teoría de Bohr, ec. (32d), tiene el mismo valor para todas las ondas de luz independientemente de la frecuencia ν . En la superficie o dentro del metal, este cuanto de luz, más conocido como fotón, es absorbido completamente y, al desaparecer, imparte su energía total a un solo electrón. Parte de esta energía, W , se consume en liberar el electrón de los átomos y sacarlo fuera de la superficie metálica y el resto es usado en dar al electrón energía cinética, $\frac{1}{2}mv^2$, y con ella una velocidad. Para algunos metales, como el platino, la energía necesaria para liberar un electrón fuera de la superficie es grande, mientras que para otros metales, como los alcalinos, es bastante pequeña. W es llamada la *función de trabajo* del metal.

33.10 Electrones secundarios. Cuando chocan electrones en la superficie de una placa de metal, desprenden de la superficie electrones adicionales libres. Estos son llamados *electrones secundarios*, y el proceso se llama *emisión secundaria*. Ver la figura 33O. Conforme la rapidez de un elec-

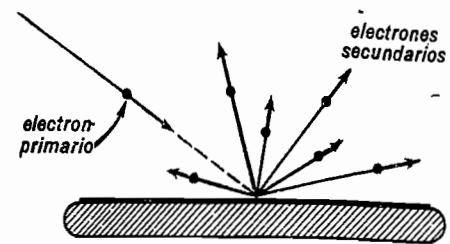


Fig. 33O. El impacto de un solo electrón libera electrones adicionales de una superficie metálica.

trón primario o incidente aumenta desde cero a unos cientos de voltios, aumenta el número de electrones secundarios hacia un máximo definido. Para la mayoría de las superficies metálicas este máximo es próximo a dos, mientras que para ciertas películas de metales alcalinos puede ser tanto como ocho o diez. En general es mayor para superficies que tienen baja función de trabajo.

33.11 Tubos fotomultiplicadores. El proceso de emisión secundaria de electrones es usado ampliamente en un tipo especial de celda fotoeléctrica, usado muy efectivamente en la detección de luz tenue. En

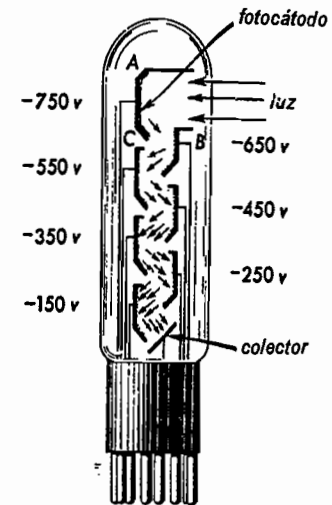


Fig. 33P. Tubo fotomultiplicador con seis pasos. Fotocátodo de óxido de cesio recubierto con plata.

la fig. 33P se da un diagrama transversal de este tubo fotomultiplicador.

El número de fotoelectrones del fotocátodo A es proporcional a la intensidad de la luz incidente. Estos son atraídos hacia el siguiente dinodo B , más positivo por unos 100 voltios, donde, por el impacto, se liberan electrones adicionales y son atraídos al siguiente dinodo C más positivo y ahí son liberados aun más electrones. Para cuando se ha llegado a la placa colectora se ha desarrollado una avalancha de electrones y son llevadas fuera por ese electrodo una carga y una corriente correlativamente grandes a un aparato registrador adecuado.

Todo el aparato es, por tanto, capaz

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Quién descubrió los rayos X? ¿Cómo se descubrieron?

2. ¿Qué contribución hizo Coolidge al diseño y construcción de los tubos de rayos X?

3. Hacer un diagrama de un tubo de rayos X de Coolidge. Rotular cada parte y describir brevemente la función de estas partes.

4. Nombrar tres propiedades importantes de los rayos X.

5. Explicar brevemente por qué permiten los rayos X que se vean los huesos del cuerpo, aun cuando los huesos están envueltos por la carne.

6. ¿Qué son los rayos X duros? ¿Qué son los rayos X blandos? ¿Cómo se relaciona la dureza o blandura de los rayos X con su longitud de onda?

7. Si un niño se tragó un alfiler de seguridad, ¿por qué aparece claramente su posición en una radiografía?

8. Después de estudiar las dos fotos de rayos X de la fig. 33D, explicar por qué se ve tan claramente la piel en la foto de la derecha y no en la de la izquierda. (Nota: El agua está compuesta de átomos de H y O, mientras que el óxido de plomo está compuesto de átomos de Pb y O.)

de recibir un haz de luz de intensidad variable, llamada señal luminosa y producir, por el efecto fotoeléctrico y la emisión secundaria, una corriente eléctrica muy fuerte, que sube y baja de intensidad al igual que la luz incidente.

Si el impacto de cada electrón libera n electrones secundarios, entonces, en un tubo de k pasos, el número que llega al colector sería n^k . Por ejemplo, si $n=6$ y $k=5$, entonces, $n^k=7776$ electrones. Esto es una ganancia enorme sobre la señal obtenida con un tubo normal. Los tubos fotomultiplicadores se han usado con el mayor éxito con luz tenue, no sólo visible, sino también con infrarroja y ultravioleta.

9. ¿Cómo se relaciona la absorción de los rayos X con la tabla periódica de los elementos?

10. ¿Cuál de los siguientes materiales es el mejor absorbente de rayos X: a) berilio; b) magnesio; c) calcio; d) cobre; e) oro; f) plomo, o g) uranio?

11. ¿Cuál es el proceso de ionización por rayos X? ¿Qué ocurre a los electrones liberados?

12. Hacer una lista de lugares específicos donde los rayos X resultarían de utilidad considerable.

13. ¿Cómo está relacionado el poder de penetración de los rayos X al voltaje aplicado al tubo?

14. Hacer un diagrama y explicar cómo se producen los diseños de Laue. ¿Qué significado tienen tales fotos?

15. Hacer un diagrama y explicar el origen atómico de los rayos X.

16. ¿Qué son los "Bremsstrahlung"? Hacer un diagrama y explicarlos brevemente.

17. Hacer un diagrama de un experimento que pueda realizarse para demostrar que los rayos X producen iones al pasar por el aire. Explicar brevemente.

RAYOS X Y EL EFECTO FOTOELÉCTRICO

18. ¿Qué es el efecto fotoeléctrico? ¿Qué son los fotoelectrones? ¿En qué se distinguen de los rayos catódicos?

19. ¿Qué es una celda fotoeléctrica? ¿Para qué se puede usar?

20. ¿Qué determina la velocidad de los fotoelectrones? ¿Cuál es la ecuación fotoeléctrica de Einstein?

21. ¿Qué es un fotón? ¿Qué es un cuanto de luz?

22. ¿Cuál es la constante de Planck? ¿Cuál es su significado?

23. ¿Qué son los electrones secundarios? ¿Cómo se emplea este principio en un tubo fotomultiplicador?

24. Hacer un diagrama de un tubo fotomultiplicador con un cátodo, ocho dinodos y una placa colectora.

25. ¿Qué es la función de trabajo de un metal? ¿Es mayor la función de trabajo de los metales alcalinos, que la de la mayoría de los metales, o es menor?

26. ¿Cómo se podría resolver el problema de mandar ondas de sonido, como la voz, mediante un haz de luz? ¿Cómo se haría variar la intensidad de una fuente de luz en semejanza con las ondas de sonido de la voz? ¿Cómo se convertiría de nuevo el haz de luz variante en ondas de sonido?

27. Encontrar la energía equivalente de

una onda luminosa de 5×10^{-7} m de longitud de onda. Esta luz está en la zona verde del espectro visible. (Resp. 3.97×10^{-19} julios.)

28. Calcular la energía en julios de la luz ultravioleta de 3×10^{-7} metros de longitud de onda.

29. Si caen en una placa de metal rayos X de 5.0×10^{-10} metros de longitud de onda, ¿cuál es la velocidad máxima de los fotoelectrones emitidos? (Considere la función de trabajo despreciablemente pequeña, $W=0$.) (Resp. 2.95×10^7 m/seg.)

30. Considerando la función de trabajo del sodio despreciable, ¿cuál será la velocidad de los fotoelectrones emitidos como resultado de la incidencia de luz de 3×10^{-8} metros de longitud de onda? Esta es luz ultravioleta.

31. Encontrar el aumento total en un tubo fotomultiplicador de diez pasos si el promedio de electrones secundarios producidos es de cinco por cada primario. (Resp. 9.77×10^6 .)

32. Un tubo fotomultiplicador de seis pasos tiene un aumento total de 15 625. Encontrar el promedio de electrones secundarios producidos por cada electrón primario.

33. Hacer un diagrama mostrando cómo puede usarse una celda fotoeléctrica para contar el número de vehículos que pasan por un punto dado de una carretera en un día.

RADIATIVIDAD

La radiactividad puede definirse como la desintegración espontánea del núcleo de uno o más átomos. Este fenómeno fue descubierto por Becquerel* en 1896 y se limita, casi por completo, a los elementos más pesados de la tabla periódica, del 83 al 96. Lo que Becquerel descubrió fue que el uranio, elemento 92, produce cierta clase de rayos que pueden atravesar varias capas de papel negro y grueso e impresionar una placa fotográfica que esté detrás del papel. Cuando este mismo fenómeno fue confirmado varios meses más tarde por Pierre y Marie Curie,** estos rayos fueron llamados rayos Becquerel.

* Antonio Enrique Becquerel (1852-1908), físico francés. Nació en París, el 15 de diciembre de 1852, Antonio sucedió a su padre en el Museo de Historia Natural en 1892. En 1896 descubrió la radiactividad, el fenómeno por el cual es más famoso. Los rayos invisibles, pero penetrantes, emitidos por el uranio y otros elementos radiactivos, son llamados ahora rayos Becquerel. Por estas investigaciones recibió el Premio Nobel de Física en 1903.

** Pedro Curie (1859-1906), físico francés, y María Curie (1867-1936), fisicoquímica polaca que trabajó en Francia. Pedro Curie se educó en la Sorbona, donde después fue profesor de Física. Aunque experimentó con la pizoelectricidad y otros temas, es principalmente recordado por el trabajo sobre la radiactividad efectuado en colaboración con su esposa. María Skłodowska, con lo que se casó en 1895. María nació en Polonia, el 18 de noviembre de 1867, donde recibió de su padre el primer entrenamiento científico. Viéndose mezclada en una organización revolucionaria estudiantil, salió de Polonia para París, donde se graduó en la Universidad. Dos años después del descubrimiento de la radiactividad, hecho por Becquerel, Pedro y María Curie aislaron de la pechblenda el polonio y el radio por un proceso fisicoquímico largo y laborioso. En 1903 recibieron la medalla Davy de la Sociedad Real y (junto con Becquerel), el Premio Nobel de Física. El profesor Curie fue electo en 1905 a la Academia de Ciencias y murió en 1906 atropellado por un carruaje. Sucediendo a su esposo como profesora en la Uni-

34.1 Descubrimiento del radio. Al contrario de lo ocurrido con muchos descubrimientos, el del radio por Pedro y María Curie en 1898 fue el resultado de una serie de experimentos cuidadosamente planeados. Habiendo encontrado que la pechblenda era una activa emisora de rayos Becquerel, los Curie trataron químicamente una tonelada de este mineral, esperando aislar de él la sustancia o elemento productor de esta actividad. La primera sustancia radiactiva concentrada que aislaron, fue llamada *polonio*, por la señora Curie, en honor de su país de origen, Polonia. Cinco meses más tarde lograron aislar una cantidad mínima de *radio*, una sustancia que es una fuente poderosa de rayos Becquerel. Los experimentos efectuados por los Curie y por otros llevaron pronto al aislamiento de muchas otras sustancias que ahora se reconocen como elementos radiactivos. Algunos de los más comunes entre ellos son el *ionio*, el *radón* y el *torio*.

34.2 Propiedades de los rayos Becquerel. Se debe al genio experimental de Rutherford* la completa solución del mis-

versidad, madame Curie fue agraciada en 1911 con el Premio Nobel de Química. Tiene la distinción única de haber tenido parte en dos Premios Nobel.

* Lord Rutherford (1871-1937), físico británico, nació en Nueva Zelanda y allí estudió en la universidad. En 1898 fue profesor Macdonald de Física en la Universidad McGill en Montreal, Canadá, y en 1907, profesor de Física en la Universidad de Manchester. En 1919 fue profesor y director de Física Experimental en la Universidad de Cambridge, y además fue profesor de la Institución Real en Londres. Su mayor fama se debe a las brillantes investigaciones con que estableció la existencia y naturaleza de las transformaciones

terio que rodeaba a la naturaleza de los rayos Becquerel. Como resultado de una extensa serie de experimentos, Rutherford y sus colaboradores descubrieron que estos rayos penetrantes eran de tres clases bien definidas. En la fig. 34A se ilustra un

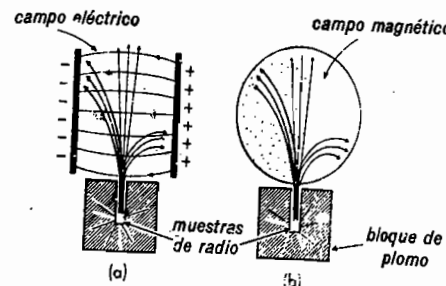


Fig. 34A. Desviación de los rayos Becquerel (a) en un campo eléctrico, y (b) en un campo magnético.

experimento simplificado para demostrarlo. Se deposita una pequeña muestra de radio en el fondo de un pequeño taladro hecho en una pieza de plomo. Esto produce un haz estrecho de rayos que salen por encima de la pieza de plomo, ya que los que penetran por las paredes de éste son absorbidos. Cuando se colocan unas placas cargadas de electricidad a los lados de ese haz, como se ve en el diagrama (a), las trayectorias de algunos rayos se flexionan hacia la izquierda, otras hacia la derecha y algunas siguen sin desviarse. Un campo magnético produce el mismo efecto, como se ve en el diagrama (b). Aquellas trayectorias que se inclinan hacia la izquierda, indican partículas cargadas positivamente, llamadas *rayos* o *partículas* α , aquellos que se flexionan hacia la derecha señalan carga negativa y son denominados *partículas* o *rayos* β y los que siguen en línea recta muestran que no llevan carga y reciben el nombre de *rayos* γ o *fonones*.

radiactivas y la estructura eléctrica del átomo. Por estos trabajos y hasta el día de su muerte, en 1937, fue reconocido por muchos como el más grande físico experimental habido. Recibió el Premio Nobel de Química en 1908 y fue armado caballero en 1914.

Rutherford pudo demostrar mediante una serie de experimentos, que cada *rayo* α en realidad es un *átomo de helio doblemente ionizado*, es decir, un átomo de helio al que le faltan los dos electrones. Esta partícula no es más que un núcleo de helio desnudo con carga positiva doble de la del núcleo de hidrógeno o protón, y con número de masa o peso atómico cuatro veces mayor. Encontró también que los *rayos* β son electrones ordinarios con una masa de $1/1840$ de la masa de un *protón* ó $1/17360$ de la masa de una *partícula* α , mientras que los *rayos* γ son ondas electromagnéticas de frecuencia igual o ligeramente mayor que los rayos X. Mientras que todos los rayos γ avanzan exactamente con la misma velocidad que los rayos X y que la luz visible, en cambio los rayos α son lanzados con una velocidad de un décimo a un centésimo de la velocidad de la luz. Las partículas β se mueven más aprisa que las partículas α , viajando algunas de ellas con un 90% de la velocidad de la luz.

34.3 Poder de ionización. Cuando los rayos Becquerel penetran en materia gaseosa, líquida o sólida, no siguen indefinidamente en movimiento, sino que son frenados lentamente por la ionización de los átomos con los que chocan a lo largo de su trayectoria. Los tres tipos de rayos, por haber sido lanzados de su fuente radiactiva con velocidades sumamente elevadas, arrancan electrones de los átomos al chocar con ellos. Son, por tanto, *agentes ionizadores*. El número de átomos ionizados producidos a lo largo del camino de una partícula α , es mucho mayor que el número creado por una partícula β o por un rayo γ . Si al avanzar la misma distancia en un material dado un rayo γ produce un átomo ionizado, una partícula β originará, en promedio aproximadamente, un centenar, y una partícula α dará lugar a cerca de 10 000. Resulta que la partícula α es un agente ionizador poderoso, mientras que los rayos γ no lo son.

Como antes se dijo, una partícula α emitida por un átomo radiactivo es sólo el núcleo de un átomo de helio al que le faltan los dos electrones necesarios para formar un átomo neutro. Mientras esta partícula se mueve a través de la materia, gana electrones y vuelve a perderlos con gran rapidez. Tan pronto como se le une un electrón, lo pierde de nuevo por la acción de otros átomos. Cuando finalmente queda en reposo, cada partícula α ha recogido y conserva dos electrones, convirtiéndose en un *átomo normal de helio*.

34.4 Poder de penetración. Los rayos Becquerel pierden en promedio en cada choque con un átomo, sólo una pequeña parte de su energía inicial. En general, una partícula α , o una partícula β , sufrirá miles de choques antes de quedar en reposo. En cada choque pierden algo de su energía cinética para ionizar el átomo encontrado, al que entregan cierta cantidad de dicha energía. Ya que las partículas α producen un mayor número de iones en una trayectoria dada, sólo avanzarán distancias cortas y, por lo tanto, tendrán menor poder de penetración. El poder de penetración de los tres tipos de rayos está

en proporción inversa aproximada con su poder de ionización.

	α	β	γ
Poder relativo de ionización	10 000	100	1
Poder relativo de penetración	1	100	10 000

34.5 Métodos de detección de los rayos Becquerel. Hay varios métodos conocidos para descubrir y medir la radiactividad; los más comunes son: el electroscopio de hojas de oro, la cámara de niebla de Wilson, el tubo contador de Geiger Mueller, el contador de cintilaciones (centelleos), y la cámara de ionización. En la Sección 33.3 vimos que los rayos X que pasan a través de un electroscopio le hacen perder la carga y bajar las hojas de oro. Esta misma acción puede lograrse con los rayos α , β o γ . La descarga será más rápida, cuanto más intensa sea la fuente de rayos o más cerca se encuentre ésta del electroscopio. Se demuestra experimentalmente que si las paredes del electroscopio son demasiado gruesas, sólo pasan los rayos γ y por esta razón se usan electroscopios de construcción especial, con paredes

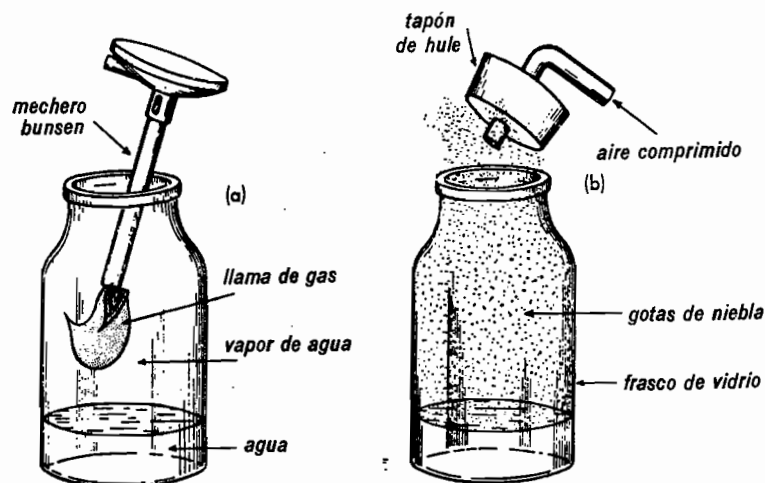


Fig. 34B. Formación de gotas de niebla sobre los iones dentro de un frasco de vidrio.

delgadas de materiales ligeros, como el aluminio, cuando se quieren usar para medir los rayos α y β .

34.6 La cámara de niebla de Wilson. En 1912 C. T. R. Wilson desarrolló un método para observar directamente las trayectorias seguidas por las partículas α y β . Como se verá en los capítulos siguientes, este método se usa ampliamente en la física atómica moderna para el estudio de muchos procesos atómicos. El aparato con que se logra esto, consiste en una cámara de expansión, en la que el vapor de agua puede condensarse sobre los iones producidos por las partículas de gran velocidad, que han pasado previamente a través del vapor.

Las condiciones necesarias para que se condense el vapor en gotas de neblina, son muy críticas. Estas condiciones son: *primero*, debe haber vapor de agua presente; *segundo*, debe haber partículas de polvo o iones sobre los cuales puedan formarse las gotas, y *tercero*, la temperatura y la presión deben llevarse a un valor definido. En la fig. 34B se ve la forma cómo se demuestra que las gotas de agua sólo se condensan sobre iones o partículas de polvo. Si se deja quieto por un corto tiempo el frasco con un poco de agua, se evaporará algo de ésta y se llenará el frasco con vapor. Después se forman los iones dentro de la botella, introduciendo momentáneamente una pequeña llama de gas, como en el diagrama (a), luego se inyecta aire comprimido al frasco a través de un tubo, de manera que cuando se quite bruscamente el tapón, la expansión brusca produzca una niebla densa, como se ve en el diagrama (b). Si no se introduce primero la llama para producir los iones, no se forma niebla de modo apreciable. El aire comprimido y la posterior expansión de la cámara, tienen por objeto bajar la temperatura, haciendo que el aire quede sobresaturado con vapor de agua. En estas condiciones el vapor se condensará sobre todas las moléculas ionizadas presentes.

327

Cuando se *dispara* una partícula α o β a través del aire, se forman iones positivos y negativos a lo largo de su trayectoria. El desprendimiento de un electrón por el choque con un átomo o molécula neutra, deja un ion cargado positivamente. El electrón que se adhiere casi inmediatamente a otro átomo o molécula, convierte a ésta en un ion negativo. Si ocurre una expansión inmediatamente después de que ha pasado una partícula α a través de la cámara de niebla, se formarán gotas de neblina sobre los iones recién creados, revelando claramente la trayectoria que ha seguido la partícula. Como se ve en las fotografías de la fig. 34C, estas huellas de

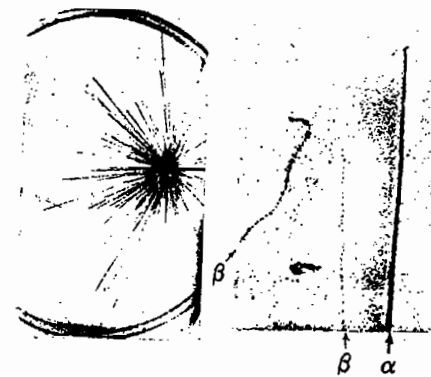


Fig. 34C. Rastros de partículas α vistas en una cámara de niebla de Wilson. (b) Rastros de una partícula α y de dos β . (Según C. T. R. Wilson, Proceedings of the Royal Society of London, vol. 87, 1917, pág. 292.)

partículas α son rectas y bastante densas, mientras que los rastros de las partículas β son retorcidos y trazados por gotas muy distanciadas. Siendo los rayos β partículas muy ligeras, son fácilmente desviadas en los choques, mientras que las partículas α , relativamente pesadas, *abren brecha* en línea recta a través de miles de átomos sufriendo sólo desviaciones circunstanciales.

En la fig. 34D se ve el esquema de un tipo de cámara de niebla de Wilson. El montaje se hace con un matraz ordinario de fondo plano con una pera de goma cubriéndole la boca. Se coloca en el extremo de un tubo de vidrio de paredes

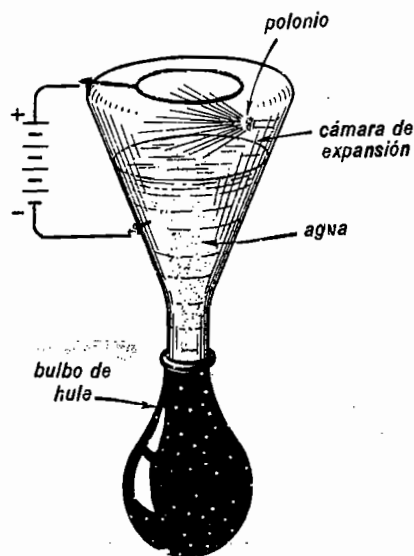


Fig. 34D. Diagrama de un tipo pequeño de laboratorio de cámara de niebla de Wilson.

delgadas un pequeño depósito de radio o de polonio. Cuando se presiona la pera de goma para comprimir el aire que está sobre el agua y luego se libera para producir la expansión, se forman gotas de niebla sobre los iones creados por las partículas α . La batería y los alambres que llegan al anillo de alambre de la parte superior de la cámara y al agua en la parte baja, tienen el propósito de eliminar rápidamente los iones previamente formados dentro de la cámara. Así se deja limpio el campo visual para las huellas recién formadas.

Nunca se observan los rayos gamma en una cámara de niebla, ya que producen muy pocos iones. Al pasar por varios pies de aire, un rayo γ producirá sólo uno o dos iones en promedio. Lo que no es suficiente para producir un rastro reconocible de neblina. Si se dispone de una fuente de rayos γ muy potente, se puede observar la presencia de ellos por los choques eventuales que algunos hayan tenido con los electrones. Estos electrones rechazados son llamados *electrones Compton*.

Otro tipo de instrumento usado para la

localización de rayos Becquerel se conoce como el tubo contador Geiger-Mueller o, más brevemente, como el contador Geiger. Este aparato se describirá detalladamente en el Capítulo 36 que estudia los rayos cósmicos.

34.7 Transmutación por desintegración espontánea. Un estudio cuidadoso de la radiactividad hace ver que dentro del núcleo del átomo se producen rayos α , β y γ . Cuando se desintegra un átomo de radio al lanzar una partícula α , el núcleo pierde una carga positiva doble (+2). Ya que el número de cargas positivas del núcleo determina el número exacto de electrones exteriores del átomo, y éste a su vez determina la naturaleza química del átomo, la pérdida de una partícula α , con dos cargas positivas, forma un nuevo elemento químico. Así por ejemplo, al desintegrarse un átomo de radio se convierte en un nuevo átomo llamado *radón*. Decimos que ha ocurrido una *transmutación*. No sólo pierde el núcleo una carga doble al emitir una partícula α , y por lo tanto, *baja dos lugares en el número atómico*, sino que también pierde cuatro unidades de peso y, por lo tanto, *baja cuatro unidades en peso atómico o cuatro unidades en número de masa*.

Cuando se desintegra un núcleo como el *radio B*, emitiendo una partícula β (un electrón), para convertirse en *radio C*, la carga positiva del núcleo *aumenta en una unidad*. Esta transmutación produce un elemento nuevo con número atómico una unidad más alto en la tabla periódica. Ya que un electrón pesa sólo la $1/1840$ parte de un átomo de hidrógeno o protón, el cambio de masa debido a la partícula β que sale del núcleo, es demasiado pequeña para cambiar el número de masa. Aunque se puede medir la pérdida de peso, cambia el peso atómico tan levemente, que para la mayoría de nuestros fines puede despreciarse, y así se hace. Un rayo γ al igual que la partícula β , cambia el peso del núcleo en una cantidad despreciable, y como no tiene carga, no altera

ni el número atómico ni el número de masa. Estos cambios, serán explicados más detalladamente en el Capítulo 38.

34.8 Período de media vida. El *período de media vida de un elemento radiactivo es el tiempo necesario para que la mitad de una cantidad dada de ese elemento se desintegre en un elemento nuevo*. Se necesitan, por ejemplo, 1 600 años para que la mitad de una cantidad dada de radio se convierta en radón. En otros 1 600 años la mitad del residuo se habrá desintegrado, quedando una cuarta parte de la cantidad original. Por eso se dice que el período de media vida del radio es de 1 600 años.

La rapidez con que se desintegra una cantidad dada de un elemento radiactivo se encuentra observando la actividad de una muestra al transcurrir cierto intervalo de tiempo y trazando una gráfica del tipo de la fig. 34E. En la figura se en-

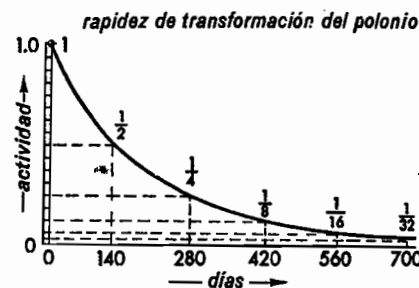


Fig. 34E. Curva de desintegración del elemento radiactivo polonio. El período de media vida del polonio es de 140 días.

cuentra que la actividad del *polonio* baja a la mitad del valor original en 140 días. En otros 140 días desciende de nuevo a la mitad, etc. El término actividad puede definirse como el número de rayos producidos en cada segundo de tiempo, o como el número de átomos ionizados producidos por los rayos cada segundo.

La única diferencia entre las curvas de desintegración de varios elementos está en la escala horizontal del tiempo. Para convertir la fig. 34E en la curva de desintegración del radio, los tiempos 140, 280,

420 días, etc., se deberán cambiar por 1 600, 3 200, 4 800 años, etc., respectivamente. Como todas las curvas radiactivas de desintegración siguen la misma ley, no se necesita esperar a que se desintegre la mitad de la muestra para poder calcular el tiempo necesario para transformar dicha mitad. Esto requeriría demasiados años de espera para algunos elementos.

34.9 Alcance. El *alcance* de una partícula α se define como la distancia a que avanza esta partícula a través de aire seco a la presión atmosférica normal. En un vacío parcial, donde hay menos moléculas con las que pueda chocar en cada centímetro, será mayor la distancia recorrida antes de que quede en reposo, mientras que en el aire a presión más alta que la normal, hay más moléculas en cada centímetro, y la distancia recorrida disminuye. Experimentalmente se ve que algunos elementos radiactivos lanzan partículas α que llevan diferentes velocidades. A mayor velocidad inicial, mayor será el alcance. El alcance de las partículas α del *radio*, es de 3.39 cm, mientras que el alcance de las partículas α del *torio C'* es de 8.62 centímetros.

El alcance de las partículas α se ha determinado en tres formas diferentes: *primero*, con la cámara de niebla de Wilson; *segundo*, por el número de iones producidos a lo largo de su camino, y *tercero*, por los centelleos producidos en una pantalla fluorescente.

En la fotografía tomada en una cámara de niebla de Wilson, de la fig. 34F, se observan partículas α de dos alcances diferentes. La muestra radiactiva usada para obtener esta foto, fue una mezcla de *torio C* y *torio C'*. Las huellas más cortas, de 4.79 cm de alcance, se deben a partículas α , producidas por el *torio C* al desintegrarse para convertirse en *torio C''*, y los rastros más largos con 8.62 cm de alcance, los originan las partículas α del *torio C'*, desintegrándose para convertirse en plomo (véase la última tabla del Apéndice III).

34.10 Series radiactivas. Rutherford y sus colegas descubrieron que, cuando se

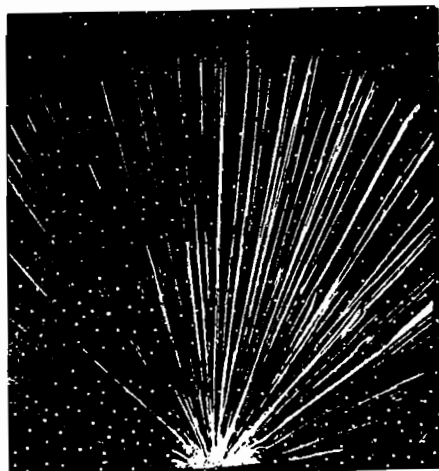


Fig. 34F. Rastros en la cámara de niebla de Wilson producidos por torio C y C'. (Según Rutherford, Chadwick y Ellis; cortesía de la Universidad de Cambridge.)

desintegra un átomo radiactivo lanzando una partícula α o β , el átomo residual es todavía radiactivo y puede lanzar más tarde otra partícula, para convertirse en otro átomo diferente. Encontraron que este proceso continúa a través de una serie de

elementos, terminando finalmente en un átomo estable, no radiactivo. Ahora se sabe que casi todos los procesos de desintegración natural que ocurren entre los elementos pesados de la tabla periódica, terminan en átomos estables de plomo de número atómico 82.

Se conocen por lo menos cuatro series o cadenas de elementos radiactivos: una empieza con el uranio-238, otra con el torio-232, una tercera con el uranio-235 y la cuarta con plutonio-241. La primera de estas series se presenta en la Tabla 34A. En el Apéndice III se dan las cuatro series en una forma gráfica.

Cuando un átomo de uranio de número de masa 238 y de número atómico 92 se desintegra lanzando una partícula α , el residuo es un átomo nuevo, uranio X_1 , de número de masa 234 y número atómico 90. Cuando se desintegra un átomo de uranio X_1 lanzando una partícula β para convertirse en uranio X_2 , el número de masa no cambia (234), mientras que el número atómico aumenta a 91. Este incremento de una carga positiva, se atribuye

TABLA 34A. SERIES DE ELEMENTOS RADIATIVOS
LA SERIE DEL URANIO-238

Elemento	Símbolo	Número atómico	Número de masa	Partícula expulsada	Alcance en aire	Media vida
Uranio I	UI	92	238	α	2.70 cm	2×10^8 yardas
Uranio X_1	UX ₁	90	234	β	....	24.5 días
Uranio X_2	UX ₂	91	234	β	....	1.14 min
Uranio II	UII	92	234	α	3.28	3×10^8 yardas
Ionio	Io	90	230	α	3.19	83 000 yardas
Radio	Ra	88	226	α	3.39	1 600 yardas
Radon	Rn	86	222	α	4.12	3.82 días
Radio A	RaA	84	218	α	4.72	3.05 min
Radio B	RaB	82	214	β	....	26.8 min
Radio C	RaC	83	214	α, β	....	19.7 min
Radio C'	RaC'	84	214	α	6.97	10^{-6} seg
Radio C''	RaC''	81	210	β	....	1.32 min
Radio D	RaD	82	210	β	....	22 yardas
Radio E	RaE	83	210	β	....	5 días
Polonio	Po	84	210	α	3.92	140 días
Plomo	Pb	82	206	estable	....	infinito

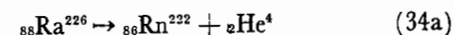
buye a la pérdida de una carga negativa. Estos procesos de desintegración progresiva continúan hasta que sólo queda plomo, un átomo estable.

Entre los físicos se acostumbra expresar a los núcleos atómicos en forma abreviada. El núcleo de radio, por ejemplo, se escribe ${}_{82}\text{Ra}^{226}$. El subíndice a la izquierda del símbolo químico da el número atómico, es decir, el número de cargas positivas del núcleo y el índice superior a la derecha da el número de masa o peso atómico.

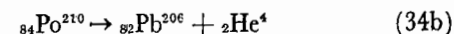
Como se explicó en la Sección 31.4, todos los átomos que tienen el mismo número atómico y diferente número de masa, se llaman isótopos del mismo elemento. Por ejemplo, ${}_{82}\text{RaB}^{214}$, ${}_{82}\text{ThB}^{212}$, ${}_{82}\text{AcB}^{211}$, ${}_{82}\text{RaD}^{210}$, ${}_{82}\text{Pb}^{208}$, ${}_{82}\text{Pb}^{206}$, ${}_{82}\text{Pb}^{207}$, y ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ son isótopos del mismo elemento químico, plomo (véase el Apéndice III). Aunque los primeros cinco elementos son radiactivos, o sea inestables, los otros tres son estables. Químicamente se comportan todos exactamente igual y es muy difícil separarlos. Los isótopos 214, 210 y 206 pertenecen a la serie del uranio-238, los isótopos 212 y 208, a la serie del torio, los isótopos 211 y 207 a la serie del uranio-235 y el 209 a la serie del neptunio.

La desintegración de núcleos radiactivos puede escribirse en forma de ecuaciones simples llamadas *reacciones nucleares*.

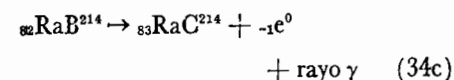
Para el radio,



para el polonio,



y para el radio B,



La suma de los subíndices del primer miembro de cada reacción, es igual a la suma de los subíndices del segundo. Lo mismo es cierto para los índices superiores. La desintegración ${}_2\text{He}^4$ representa la partícula α y ${}_{-1}\text{e}^0$ representa la partícula β . En casi todas las desintegraciones radiactivas en que se emite una partícula β , también aparecen rayos γ . En tales casos, como se ve en el ejemplo de la ec. (34c), el radio B emite una partícula β y un rayo γ para convertirse en radio C, un núcleo con número atómico mayor en una unidad pero con el mismo número de masa.*

* Para un estudio más completo de la radiactividad, véase *The Particles of Modern Physics*, por J. D. Stranathan, The Blakiston Co.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Quién fue el descubridor de la radiactividad? ¿En qué circunstancias?
2. ¿Quién descubrió el radio, el polonio y el torio?
3. ¿Qué nombres se dan a los diferentes rayos radiactivos? ¿Quién desentrañó el misterio?
4. ¿Qué son los rayos alfa, beta y gamma?
5. ¿Cuáles son los poderes relativos de ionización y los poderes de penetración de los diferentes rayos?

6. ¿Qué es una cámara de niebla de Wilson? ¿Cómo funciona?
7. ¿Qué clase de partículas pasan sin dejar rastro en la cámara de niebla de Wilson? ¿Por qué?
8. ¿Qué es la desintegración espontánea?
9. ¿Qué es la transmutación? ¿Qué cambios ocurren en el núcleo de un átomo cuando se emite una partícula alfa? ¿Qué cambios ocurren cuando se emite una partícula beta?
10. ¿Qué se entiende por media vida de un isótopo radiactivo?

11. ¿Qué se entiende por el alcance de los rayos radiactivos? ¿Cuál de las tres clases de rayos deben tener mayor alcance?

12. ¿Cómo se designan en forma abreviada los núcleos atómicos? Dar tres ejemplos.

13. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes vocablos: a) radiactividad; b) media vida; c) alcance; d) átomo estable, y e) rastro de cámara de niebla.

14. Nombrar el primero y el último elemento de una serie radiactiva así como otros tres elementos pertenecientes a la misma serie. Hacer una lista de ellos en el orden decreciente de número de masa.

15. Consultando la última tabla del Apéndice III, hacer una tabla de la serie radiactiva que empieza con el actino-urano, ${}_{82}\text{AcU}^{235}$ y termina con ${}_{82}\text{Pb}^{207}$.

16. Consultando la última tabla del Apéndice III, hacer una tabla de la serie radiactiva que empieza con torio, ${}_{90}\text{Th}^{232}$ y termina con plomo, ${}_{82}\text{Pb}^{208}$. Dar a su tabla la misma forma de las primeras cinco columnas de la Tabla 34A.

17. Consultando la última tabla del Apéndice III, hacer una tabla de la serie radiactiva que empieza con neptunio, ${}_{93}\text{Np}^{237}$ y termina con bismuto, ${}_{83}\text{Bi}^{209}$. Dar a su tabla la forma que tienen las cinco primeras columnas de la Tabla 34A.

18. Hacer un diagrama y explicar los principios fundamentales de la cámara de niebla de Wilson. Explicar las diferencias entre los rastros dejados por rayos alfa, beta y gamma.

19. Consultando el Apéndice III, ¿cuáles átomos son isótopos del polonio? Dar sus símbolos, números atómicos como subíndices y números de masa como exponentes.

20. Consultando el Apéndice III, ¿qué átomos son isótopos del torio? Dar sus sím-

bolos, números atómicos como subíndices y números de masa como superíndices.

21. Consultando el Apéndice III, ¿qué átomos son isóbaros de: a) ${}_{84}\text{Po}^{210}$; b) ${}_{82}\text{AcB}^{211}$, y c) ${}_{82}\text{ThB}^{212}$?

22. Escribir la reacción nuclear de la desintegración de: a) uranio X_8 , UX_2^{234} , y b) ionio, Io^{230} . Ver el Apéndice III.

23. Escribir la reacción nuclear de la desintegración de: a) radón, Rn^{222} , y b) radio E, RaE^{210} . Ver el Apéndice III.

24. Escribir la ecuación de la reacción nuclear de la desintegración de: a) actinio A, AcA^{210} ; b) Torio, Th^{232} , y c) radio D, RaD^{210} . Ver el Apéndice III.

25. Escribir en forma abreviada la reacción nuclear para la emisión de una partícula alfa de un núcleo de ionio (número atómico, 90). Ver el Apéndice III.

26. Escribir la reacción nuclear de la emisión de una partícula α por el radio A (número atómico 84). Ver el Apéndice III.

27. Escribir la reacción para la emisión de una partícula alfa de uranio-238. Ver el Apéndice III.

28. Escribir la reacción nuclear de la emisión de una partícula β por el radio B. Ver el Apéndice III.

29. Si la actividad de una muestra radiactiva baja 1/8 de su valor inicial en 2 horas y 15 min, ¿cuál es su media vida?

30. La actividad de una muestra radiactiva baja a 1/32 de su valor inicial en 7.5 h. Encontrar su media vida.

31. Cuánto tardará una muestra de radón en reducirse al 10% si su media vida es de 3.82 días? Encontrar la respuesta construyendo una curva de desintegración.

32. ¿Cuánto tardará una muestra de radio D en disminuir al 10% si su media vida es de 22 años?

35

COLISIONES ATOMICAS Y DESINTEGRACIONES NUCLEARES

El descubrimiento de la desintegración y la transmutación de los elementos estables en experimentos regulados se atribuye al gran genio experimental de lord Rutherford. Para los extraños puede parecer que este descubrimiento fue accidental, pero para quienes lo conocieron bien, saben que fue el resultado de una serie de investigaciones bien planeadas. Es cierto que él no predijo el fenómeno antes de descubrirlo, pero su gran experiencia con la radiactividad y su aguda visión, le permitieron reconocer el significado y la importancia del fenómeno al verlo por primera vez. Debe reconocerse también el admirable trabajo de sus colaboradores y de los investigadores de otros laboratorios, que desde entonces han hecho avanzar mucho más estos trabajos.

35.1 Choques elásticos entre los átomos. Los choques entre partículas atómicas libres, fueron estudiados por primera vez por Rutherford con el aparato que se ve en la fig. 35A. A un tubo largo de vidrio que contiene una pequeña muestra de ma-

terial radiactivo, R , se le extrajo el aire lo mejor posible, por medio de una bomba de vacío; luego se le llenó con un gas de constitución conocida. Entonces se dejaron avanzar las partículas α de la fuente radiactiva a través del gas, hasta el otro extremo del tubo y, a través de una lámina delgada de aluminio, llegar a una pantalla fluorescente S , donde fueron observadas como centelleos en el campo visual del microscopio M .

Teniendo aire en el tubo T y usando el radio C' como fuente de partículas α , se pudieron observar los centelleos en una pantalla a 7 cm. Teniendo hidrógeno en el tubo, se encontró que podía aumentarse grandemente la distancia d . Colocando láminas de aluminio de distintos espesores entre F y S , se determinó que el alcance de las partículas era equivalente a 28 cm de aire. La conclusión que Rutherford sacó de este resultado fue que las partículas α inciden ocasionalmente sobre un átomo de hidrógeno, de modo muy semejante a cómo choca una pelota con otra más ligera, lanzando a ésta con una velocidad mayor y,

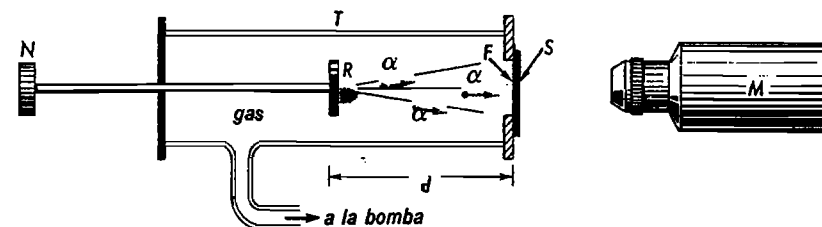


Fig. 35A. Aparato de Rutherford usado para descubrir las colisiones atómicas entre partículas alfa del radio y los átomos de un gas, como hidrógeno, helio, nitrógeno, oxígeno, etc.

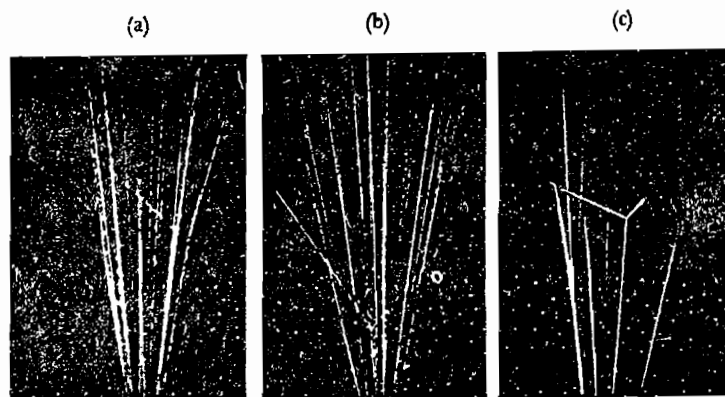


Fig. 35B. Fotografías en la cámara de niebla de Wilson de colisiones entre partículas alfa y: (a) un átomo de hidrógeno, (b) un átomo de helio y (c) un átomo de oxígeno. (Según Rutherford, Chadwick y Ellis.)

por lo mismo, con una mayor potencia de penetración. Algunos de los muchos átomos de hidrógeno que se encuentran con las partículas α , chocan *de frente* y salen disparados en la dirección que traía la partícula α con una velocidad 1.6 veces mayor que la de dicha partícula incidente.

El enorme aumento del alcance se debe principalmente a la gran velocidad. A cada núcleo de hidrógeno, llamado *protón*, se le ha quitado su electrón orbital y, como tiene una sola carga positiva, produce menos iones por centímetro de camino que una partícula α con doble carga positiva. Resulta curioso que los protones y partículas α con la misma velocidad tengan un alcance semejante. La razón de esto es que, aunque la partícula α tiene una carga doble de la que tiene un protón y produce más iones por cada centímetro de su recorrido, que tienden a detenerla más rápidamente, también tiene cuatro veces más masa y, por lo tanto, cuatro veces su energía. Más adelante, en la fig. 35H, veremos que, si comparamos *protones* y *partículas α* que tengan la misma energía cinética, los protones tienen unas diez veces su alcance.

Con la cámara de niebla de Wilson se puede hacer un estudio más convincente de estas colisiones atómicas. Entre los miles de fotografías tomadas en la cámara de

niebla de las huellas iónicas producidas por las partículas α de los elementos radiactivos, ocasionalmente se observan rastros del tipo que se reproduce en la figura 35 B. Cuando se tomaron estas foto-

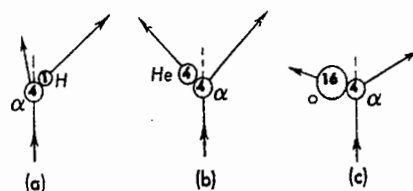


Fig. 35C. Diagramas de las colisiones entre partículas α y átomos de distintas masas.

grafías, la cámara de niebla estaba llena de diferentes gases. Para la fotografía (a), la cámara de niebla contenía hidrógeno, para (b), helio, y para (c), oxígeno. En la figura 35G se presentan esquemas de estas colisiones. Nótese en (b) que el ángulo entre las partículas que salen disparadas, es de 90° , un ángulo recto.

La mayoría de las colisiones entre los átomos, no son *de frente*, sino que las partículas incidentes chocan en forma lateral. Cuando incide una partícula α con masa atómica 4 sobre un átomo de hidrógeno con masa atómica 1, la partícula se aparta poco de su camino, mientras que el átomo de hidrógeno casi siempre se desvía un

ángulo muy grande. Esto va de acuerdo con las leyes de la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento aplicada a dos esferas perfectamente elásticas.

Cuando se encuentra una partícula α con un átomo de helio, las dos partículas tienen la misma masa atómica de 4, y ambas se desvían el mismo ángulo. Las leyes de la mecánica nos dicen que para una colisión *de frente* entre esferas perfectamente elásticas de masas iguales, una moviéndose y la otra en reposo, la partícula incidente es detenida por el choque y la segunda sale despedida en la misma dirección que seguía la primera y con toda la velocidad.

Cuando choca una partícula α con un átomo de oxígeno que tiene una masa atómica de 16, este último se desvía hacia un lado con una velocidad relativamente baja, mientras que la partícula α se desvía hacia el otro lado con una velocidad grande o pequeña, según el ángulo con que salga. El átomo de oxígeno con su masa y su carga mayores, ioniza más partículas por centímetro de trayectoria y, por lo tanto, deja un rastro más corto y más marcado.

Debe señalarse que las colisiones atómicas en que intervienen velocidades tan grandes, tienen lugar entre los pesados núcleos de los átomos y son afectadas muy poco por los ligeros electrones orbitales. Si un núcleo es golpeado fuertemente en un choque, será desprovisto de sus electrones parcial o totalmente. Cuando queda en reposo, recogerá suficientes electrones para transformarse pronto en un átomo neutro.

35.2 El descubrimiento de la desintegración nuclear. Al repetir los experimentos sobre el alcance, indicados en la figura 35A, con un gas pesado dentro del tubo T, hizo Rutherford, en 1919, un nuevo y sorprendente descubrimiento. Cuando admitía nitrógeno (peso atómico 14) en el tubo, los centelleos podían observarse hasta una distancia de la fuente de 40 cm o más.

Nunca se habían observado antes partículas de tan largo alcance. ¿Cuáles eran estas partículas de largo alcance? No podían ser electrones o rayos γ , porque éstos no son capaces de producir centelleos visibles. Rutherford dejó que los nuevos rayos pasaran a través de un campo magnético, y por su desviación descubrió que tenían la masa y la carga de los protones. En otras palabras, las partículas de largo alcance eran núcleos de hidrógeno.

Rutherford no tardó mucho en dar la explicación justa de este fenómeno. Una partícula α , cerca del principio de su recorrido, donde su velocidad es grande, puede tener un choque *de frente* con un núcleo de nitrógeno y ser capturada. Esta captura es seguida inmediatamente por una desintegración en la que es emitido un protón con gran velocidad. En la fi-

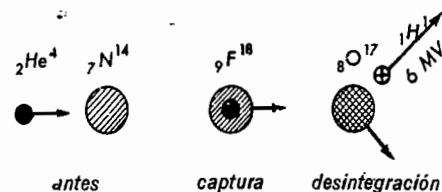
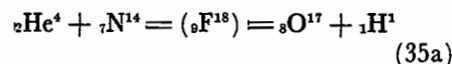


Fig. 35D. Desintegración de un núcleo de nitrógeno por una partícula α a gran velocidad.

gura 35D se indica este proceso, y la transformación se puede representar con la siguiente reacción.



Cuando la partícula α con carga de +2, y masa 4, choca con el núcleo de nitrógeno con carga de +7 y masa 14, forman una sola partícula con carga +9 y masa 18. Ya que un átomo con una carga nuclear de +9 debería tener todas las propiedades químicas del *flúor*, de número atómico 9, el núcleo recién formado se designa como ${}_9\text{F}^{18}$.

Una inspección de la tabla de los isótopos (véase el Apéndice III), nos hace ver que no existe en la naturaleza este isótopo. La razón de esto es evidente

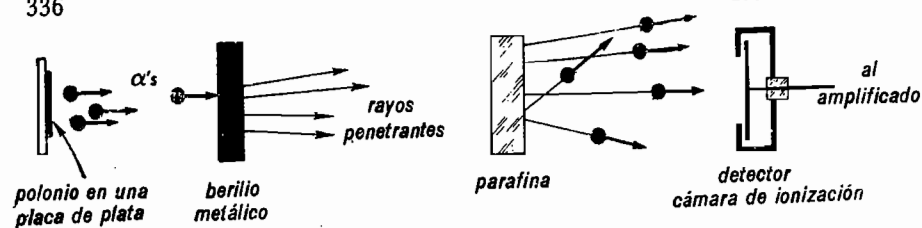
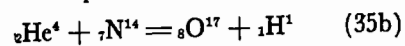


Fig. 35E. El experimento con que Chadwick descubrió el neutrón. Los rayos penetrantes son neutrones y rayos α .

cuando se comprende que esta combinación de partículas no es estable. Un núcleo de flúor de masa 18 es inestable y se desintegra desprendiendo un protón, una partícula con carga $+8$ y masa 17. Se ve en el Apéndice III que con el número atómico 8 existe un isótopo de oxígeno de masa 17, que es estable y que se encuentra en la naturaleza.

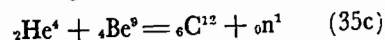
Resulta que el proceso anterior de desintegración empezó con dos núcleos estables, helio y nitrógeno, y crea dos nuevos núcleos estables, oxígeno e hidrógeno. Esto se llama una *transmutación* de elementos. Debido a que el paso intermedio indica sólo una existencia momentánea del núcleo de flúor, ${}^8\text{F}^{18}$, frecuentemente se omite esta etapa en la discusión del proceso anterior, y la reacción de desintegración se escribe simplemente.



El signo de igualdad es reemplazado con frecuencia por una flecha.

Estas reacciones de transformación son como las ecuaciones y deben equilibrarse: primero, la cantidad total de carga debe mantenerse la misma, y segundo, los números de masa deben ser iguales. Lo primero de esto se logra igualando la suma de los subíndices en un miembro de la reacción, la suma de los subíndices del otro miembro, y lo segundo, haciendo que la suma de los subíndices superiores sea la misma en los dos lados. En todo átomo, al conocer el subíndice que representa la carga nuclear, se tiene el factor que determina a qué elemento químico pertenece este átomo.

35.3 La identificación del neutrón por Chadwick. En 1932 efectuó Chadwick en Inglaterra un experimento por el cual recibió después el Premio Nobel de Física en 1935. Como se representa en la figura 35E, su experimento consistió en bombardear un banco de berilio con partículas α . Las partículas penetrantes que salieron del berilio, se dejaron caer en una placa de parafina de la cual se encontró que salían protones con gran velocidad. Por los cálculos de energía, pudo demostrar que los rayos penetrantes eran partículas no cargadas con la masa de los protones y que él llamó neutrones. La desintegración que ocurre en el blanco metálico es la siguiente (véase la fig. 35F):



Las partículas α , ${}_2\text{He}^4$, chocan y se unen con el núcleo de berilio ${}_4\text{Be}^9$, causando una desintegración en la que es expulsado un neutrón ${}_0\text{n}^1$, con gran velocidad. La partícula residual, con carga $+6$ y con masa de 12 unidades, es un núcleo estable de carbono, tal como se encuentra en la naturaleza.

Los rayos penetrantes que salen del berilio en la fig. 35E, son principalmente neutrones, que al bombardear la placa de parafina, chocan elásticamente con los átomos de hidrógeno, lanzándolos hacia otro lado. Un choque elástico *de frente* entre dos partículas del mismo peso, como un neutrón y un protón, traspasa toda la velocidad de uno al otro; el neutrón se detiene y el protón sigue adelante. Los protones, que tienen carga positiva, pueden observarse por sus huellas en una cámara

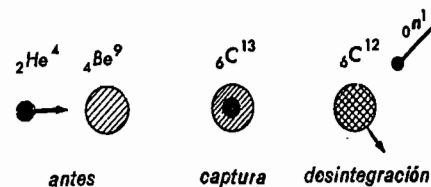


Fig. 35F. Descubrimiento del neutrón.

de niebla de Wilson, mientras los neutrones no.

La razón de que los neutrones rápidos tengan un poder tan grande de penetración, es que no se detienen a ionizar átomos al pasar cerca de ellos. Un protón, un electrón o una partícula α , tienen carga y pueden ionizar átomos atrayendo o rechazando los electrones desde cierta distancia, pero un neutrón, sin ninguna carga, no puede hacerlo. Para que sea detenido o reduzca su velocidad, deberá efectuar un choque directo con otra partícula.

Los neutrones pueden producirse ahora en haces tan intensos, que se usan con frecuencia en lugar de los rayos X, siempre que se desea usar radiaciones de alto poder de penetración.

35.4 El núcleo contiene neutrones y protones. Desde la época en que Chadwick identificó el neutrón como partícula elemental, nuestras ideas respecto al núcleo del átomo han tenido que modificarse. Ahora creemos que el núcleo contiene sólo dos clases de partículas, neutrones y protones. Cada neutrón tiene una masa unidad y no tiene carga, mientras que cada protón tiene una masa unidad y una carga positiva unidad. Esto difiere de la idea antigua de que el núcleo contenía protones en número igual al de su peso atómico y los electrones suficientes para neutralizar el exceso de carga sobre la cantidad especificada por el número atómico.

Ya que sólo los protones tienen carga, cualquier núcleo dado de número atómico Z y número de masa M , se cree ahora que tiene Z protones y $M-Z$ neutrones, y que en un átomo neutro, el número de los protones es igual al número de electro-

nes orbitales. En la Tabla 35A se dan como ejemplo las partículas nucleares de algunos elementos de la tabla periódica.

Tabla 35A. NÚMERO DE NEUTRONES Y PROTONES EN EL NÚCLEO DE ALGUNOS ELEMENTOS

Átomos	Protones	Neutrones
${}_1\text{H}^1$	1	0
${}_1\text{H}^2$	1	1
${}_2\text{He}^4$	2	2
${}_3\text{Li}^6$	3	3
${}_3\text{Li}^7$	3	4
${}_4\text{Be}^9$	4	5
${}_4\text{Be}^{10}$	4	6
${}_5\text{B}^{11}$	5	6
${}_7\text{N}^{13}$	7	6
${}_8\text{O}^{16}$	8	8
${}_{11}\text{Na}^{23}$	11	12
${}_{29}\text{Cu}^{65}$	29	36
${}_{80}\text{Hg}^{200}$	80	120
${}_{92}\text{U}^{238}$	92	146

La fig. 35G presenta diagramas esquemáticos de los núcleos de cinco átomos diferentes.

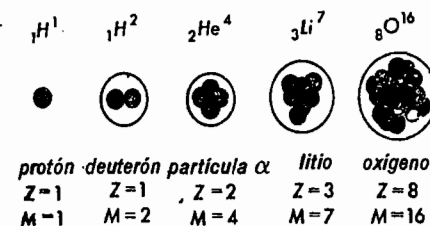


Fig. 35G. Número de protones y neutrones en los núcleos de hidrógeno, deuterio, helio, litio y oxígeno.

Los núcleos de todos los elementos, sean estables o radiactivos, son llamados *núclidos*. Como todos los núclidos están compuestos de protones y neutrones, estos *ladrillos nucleares* son llamados *nucleones*.

35.5 La masa es una forma de energía. Al desarrollar su teoría de la relatividad, Einstein llegó a un grupo de ecuaciones simples concernientes a la naturaleza del

mundo físico. Ahora es importante considerar una de estas ecuaciones, ya que es necesaria para explicar los experimentos de la desintegración atómica y éstos a su vez sirven para comprobarla. La relación a que nos referimos se conoce como la *ecuación de la masa y la energía de Einstein*. En su forma más simple esta ecuación se escribe así,

$$E = mc^2 \quad (35d)$$

donde m representa la masa, c la velocidad de la luz en el vacío y E la equivalencia de la masa en energía.

Esta relación predice que la masa se convierte en energía, o la energía en masa. En otras palabras, la masa es una forma de energía, porque si se puede desintegrar una cantidad de masa m , aparecerá una cantidad definida de energía E en alguna otra forma. Para ilustrar esto, supongamos que se pudiera desintegrar completamente un kg de masa y que se diera a otro cuerpo la energía liberada en forma de energía cinética

$$E = 1 \text{ kg} \times (3 \times 10^8 \text{ m/seg})^2 \\ = 9 \times 10^{16} \text{ julios} \quad (35e)$$

Esta energía es suficiente para impulsar al barco más grande que exista durante una vuelta alrededor del mundo.

La aniquilación de la masa es entonces una fuente insospechada de energía. La desintegración es un medio por el cual ya se puede aniquilar o crear la masa más o menos a voluntad del experimentador.

Si es aniquilado un átomo, una parte de un átomo o un electrón, su energía puede transformarse en energía cinética y dársele a otra partícula atómica en la forma de velocidad o bien aparecer como un rayo γ de frecuencia ν y energía $h\nu$ específicas. Para encontrar la equivalencia entre la energía de masa, la energía de los rayos γ y la energía cinética, se tiene la siguiente igualdad múltiple.

$$E = mc^2 = h\nu = \frac{1}{2}mv^2 = Ve \quad (35f)$$

Entre los físicos se acostumbra expresar cada una de estas energías en voltios de potencial eléctrico V . Así se habla de un rayo γ de un millón de voltios, de un electrón de 3 millones de voltios, o de un protón de 12.5 millones de voltios, etc. Esta terminología es usada sólo por conveniencia, y expresa el valor de V en la ecuación anterior que, con la carga electrónica sustituida por la letra e , da la energía del protón, del rayo γ o de la partícula atómica en movimiento, en electrón voltios.

Para dar unos ejemplos, supongamos que pueda aniquilarse un electrón y queramos expresar en voltios la energía liberada. Para calcular V , usamos la igualdad del segundo y el último miembro de la ecuación (35f), es decir,

$$mc^2 = Ve \quad (35g)$$

Sustituyendo la masa electrónica $m = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ culombios}$, y $c = 3 \times 10^8 \text{ m/seg}$, obtenemos $V = 511\,000$ voltios.

$$\text{Energía de aniquilación de un electrón} \\ = 0.511 \text{ Mev} \quad (35h)$$

Esto significa que, si la energía liberada en la aniquilación de un electrón pudiera darse a otro electrón en forma de energía cinética, ese electrón tendría una velocidad equivalente a la originada por medio millón de voltios. En otras palabras, tendría la misma velocidad y energía que un electrón que hubiera sido acelerado por una diferencia de potencial de 511 000 voltios en un tubo del tipo que se ve en la fig. 30I.

En ciertos procesos que se describirán en el siguiente capítulo, se convierte a veces la masa atómica en un rayo γ . Para calcular la frecuencia de un rayo γ , producido por la aniquilación de un electrón, usamos el segundo y el tercer miembro de la ecuación (35f),

$$mc^2 = h\nu \quad (35i)$$

y encontramos $\nu = 1.2 \times 10^{20} \text{ vib/seg}$. Esta frecuencia es 200 000 veces mayor que la frecuencia de la luz verde visible y la longitud de onda es de unas dos centésimas de angström. Como comprobación de la ecuación (35i), se ve experimentalmente que los rayos γ , con frecuencia doble de ésta (o superior), producen pares de electrones por colisión. Véase la figura 36H.

Como tercero y último ejemplo, podemos calcular la energía liberada por la aniquilación de una *unidad atómica de masa*, es decir, la energía equivalente a un dieciseisavo de la masa de un átomo de oxígeno ordinario. Sustituyendo los valores conocidos de m , c y e en la ecuación (35g), se obtiene lo siguiente.

$$\text{Energía de aniquilación} \\ \text{de una unidad atómica} \\ \text{de masa} = 931 \text{ Mev} \quad (35j)$$

Éste es un número que conviene memorizar, porque se usa con frecuencia en los siguientes capítulos. La unidad atómica de masa se abrevia *uam*.

35.6 Las masas atómicas no son números enteros. Cuando una partícula α choca con el núcleo de un átomo y produce una desintegración como se vio en la fig. 35D, la energía total debe ser igual antes y después del choque. Para comprobarlo, deben incluirse todas las formas de energía que intervienen en el proceso, es decir: 1) la *energía cinética de todas las partículas*; 2) la *energía cinética del rayo γ , si interviene*, y 3) la *energía de masa*. Es necesario considerar esta última, ya que los experimentos de desintegración demuestran que, generalmente, la masa total de las dos partículas que chocan, no es igual a dicha masa después de la desintegración. Para comprobar este cambio, es necesario que sepamos las masas exactas de todos los diferentes átomos.

Las medidas espectrográficas de masa realizadas por Aston, Bainbridge y otros,

hacen ver que las masas de los átomos no son números enteros exactos, como se dan en el Apéndice III. En el Apéndice IV se exponen algunas de las determinaciones de masa más precisas de los elementos ligeros de la tabla periódica. Estos valores están basados todos en el isótopo 16 del oxígeno tomado con una masa de exactamente 16.0000.

35.7 La conservación de la energía en las desintegraciones nucleares. Para ilustrar la ley de la conservación de la energía aplicada a las desintegraciones nucleares, consideremos el primer experimento de Rutherford, indicado en las figs. 35A y 35D, donde las partículas α del radio C' pasan a través de nitrógeno gaseoso y desintegran, por choques, a los núcleos de nitrógeno. La energía total de cualquier par de partículas antes del impacto, será la suma de las masas de los dos núcleos, ${}^4\text{He}^+ + {}^{14}\text{N}^+$, más su energía cinética E_1 . La energía total después del impacto será la suma de las masas de los dos núcleos ${}^{17}\text{O}^+$ y ${}^1\text{H}^+$, más su energía cinética E_2 , o sea,

$${}^4\text{He}^+ + {}^{14}\text{N}^+ + E_1 \\ = {}^{17}\text{O}^+ + {}^1\text{H}^+ + E_2 \quad (35k)$$

Se acostumbra expresar las energías E_1 y E_2 en *unidades atómicas de masa* o en *millones de electrón voltios, Mev*. La energía cinética antes del impacto, está encerrada en la partícula α del radio C', que se ha medido y se ha encontrado que equivale a 7.7 Mev. Dividiendo este valor por 931, según la ec. (35j), da su equivalente de 0.0083 unidades atómicas de masa. Sumando la energía de masa de los dos lados de la ec. (35k), debemos obtener el mismo total.

$$\begin{array}{rcl} {}^4\text{He}^+ & = & 4.0039 \text{ } {}^{17}\text{O}^+ = 17.0045 \\ {}^{14}\text{N}^+ & = & 14.0075 \text{ } {}^1\text{H}^+ = 1.0081 \\ E_1 & = & 0.0083 \quad E_2 = ? \quad (35l) \\ \hline \text{Total} & = & 18.0197 \quad = 18.0197 \end{array}$$

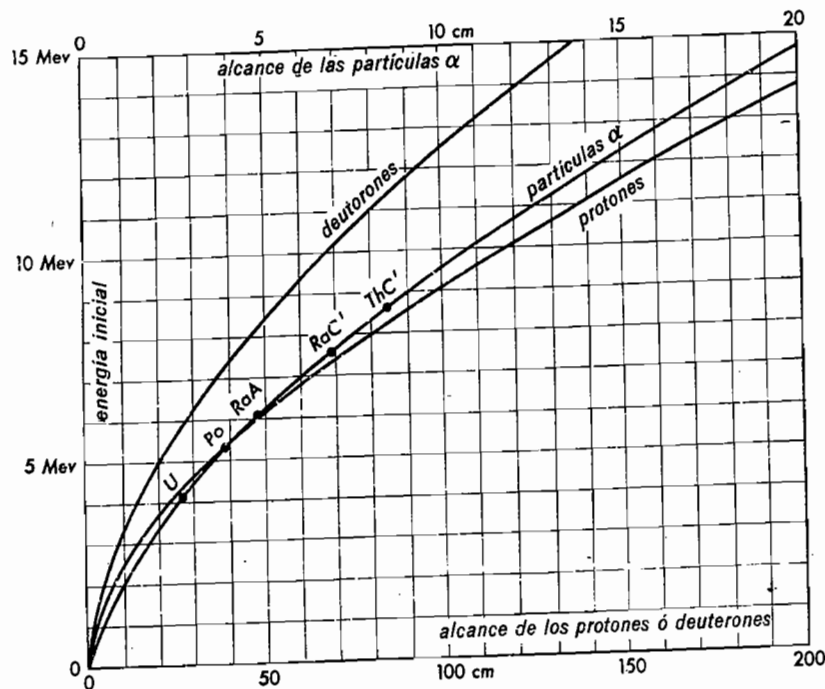


Fig. 35H. Gráfica de los alcances de los protones, deutrones y partículas alfa para diferentes energías iniciales expresadas en millones de electrón-voltios.

La simple suma y resta demuestran que para que la columna del lado derecho tenga la suma apropiada, E_2 debe ser igual a 0.0071 unidades atómicas de masa. Multiplicándolo por 931 obtenemos, esta vez, 6.6 Mev como la energía liberada. Ésta es la energía que se utiliza en la explosión que separa el protón del núcleo de oxígeno.

Generalmente, al desintegrarse un núcleo atómico dividiéndose en dos partículas, la energía de aniquilación se reparte entre ellas. Experimentalmente se ve que esta repartición ocurre siguiendo las leyes de la mecánica, la energía cinética de las dos partículas está aproximadamente en proporción inversa a sus masas respectivas.

En el ejemplo anterior, cuando la energía disponible se reparte entre un núcleo de oxígeno de masa 17 y un protón de masa 1, el núcleo $^{16}\text{O}^{17}$ adquiere una energía de 0.4 Mev y el protón una energía

de 6.2 Mev. Un protón con esta velocidad y esta energía cinética, tiene un alcance de 49 cm en el aire. Las recientes repeticiones del experimento de Rutherford dan un alcance medido de 48 centímetros y una energía de 6 Mev, que coinciden con los cálculos.

La fig. 35H presenta unas gráficas que dan el alcance de los protones, deutrones y partículas α de diferentes energías. Estas tres curvas son extremadamente útiles en los trabajos de desintegración, porque conociendo el alcance de una partícula, se puede obtener su energía inicial o, conociendo esta última, se puede calcular el alcance. Es interesante hacer notar que, para la misma energía, un protón tiene 10 veces el alcance de una partícula α . Los deutrones se considerarán en detalle en los capítulos posteriores.

* Radioactivity and Nuclear Physics, por J. M. Cork, D. Van Nostrand Co., Inc.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Qué se entiende por una colisión perfectamente elástica? ¿Son perfectamente elásticos siempre los choques de núcleos atómicos?

2. Explicar brevemente el experimento de Rutherford para medir el alcance de las partículas α en diferentes gases. Hacer un diagrama. ¿Qué resultados particulares se observan?

3. ¿Quién descubrió la desintegración nuclear por choques de partículas α ? ¿Cómo fue ese experimento? ¿Podemos escribir las reacciones nucleares que intervienen?

4. ¿Quién descubrió el neutrón? ¿Cómo fue ese experimento? ¿Por qué los neutrones no producen rastros en la cámara de niebla?

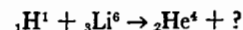
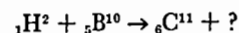
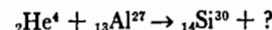
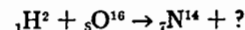
5. ¿Cuántos protones se han de encontrar en un núcleo dado? ¿Cuántos neutrones hay en él?

6. Hacer una tabla de los siguientes átomos, dando el número de protones y neutrones en cada núcleo: a) Na^{23} ; b) Co^{59} ; c) Sn^{120} ; d) Bi^{209} ; y e) Cf^{241} .

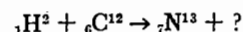
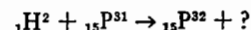
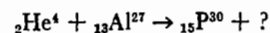
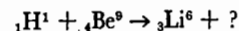
7. ¿Cuál es la ecuación de masa y energía de Einstein? ¿Qué significa?

8. ¿Cómo puede expresarse la energía en voltios? ¿Cuál es la relación básica entre las distintas formas de energía atómica y la energía equivalente en voltios?

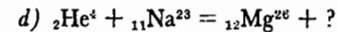
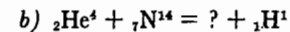
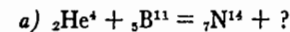
9. Completar las siguientes reacciones de desintegración:



10. Completar las siguientes reacciones de desintegración:



11. Completar las siguientes reacciones nucleares:



12. Calcular la masa atómica equivalente a una energía de: a) 20 Mev; b) 30 Mev, y c) 54 Mev.

13. Encontrar la masa atómica equivalente a una energía de: a) 8 Mev; b) 12.5 Mev, y c) 16.8 Mev. (Resp. a) 0.00856; b) 0.0134; c) 0.0180.)

14. De las gráficas de la fig. 35H, obtener los alcances de las siguientes partículas: a) protones de 10 Mev; b) protones de 8 Mev; c) partículas α de 13 Mev, y d) partículas α de 10 Mev.

15. Usando las gráficas de la fig. 35H, encontrar los alcances de las siguientes partículas: a) protones de 12 Mev; b) protones de 8.7 Mev; c) partículas α de 9 Mev, y d) partículas α de 9.5 Mev. (Resp. a) 159 cm; b) 90 cm; c) 8.9 cm; d) 9.7 cm.)

16. Los protones de una muestra radiactiva tienen un alcance de 120 cm en el aire. Encontrar su energía en Mev mediante las gráficas de la fig. 35H.

17. Se encuentra que el alcance de las partículas de una muestra radiactiva es de 21 cm en el aire. Encontrar su energía en Mev extrapolando la gráfica de la fig. 35H. (Resp. 15.2 Mev.)

18. Se encuentra que los deutrones de un pequeño ciclotrón tienen un alcance de 150 cm en el aire. Encontrar su energía en Mev extrapolando la gráfica de la figura 35H.

19. La masa de 1 uam es igual a 1.66×10^{-27} kg. Si se aniquila esta masa, ¿cuánta sería la energía convertida, en electrón voltios? (Resp. 931 Mev.)

20. Si pudiera aniquilarse un átomo de oxígeno, de número atómico de masa 16, ¿cuánta energía en electrón voltios sería liberada?

21. Si se aniquilara completamente un protón, ¿cuánta energía en electrón voltios sería liberada? (*Resp.* 938 Mev.)

22. Si se pudiera aniquilar entero un átomo de helio, ¿cuánta energía en julios sería liberada?

23. Si se pudiera aniquilar un kilogramo de masa, ¿cuánta energía en ergios sería liberada? (*Resp.* 9×10^{23} ergios.)

24. ¿Cuánta energía sería liberada en Mev, si son aniquiladas las siguientes masas atómicas: a) 0.0032 uam, y b) 0.0128 uam?

25. Si se aniquilaran las siguientes masas: a) 0.0094 uam, y b) 0.0235 uam,

¿cuánta energía en Mev sería liberada? (*Resp.* a) 8.75 Mev; b) 21.9 Mev.)

26. ¿Cuál es la energía equivalente, en electrón voltios, de un rayo gamma cuya frecuencia es de 3×10^{18} vib/seg?

27. ¿Cuál es la energía equivalente, en electrón voltios, de un protón moviéndose con un décimo de la velocidad de la luz? (*Resp.* 4.70 Mev.)

28. Si el 1% de un kilogramo de uranio se pudiera convertir en energía, cuántos julios se producirían?

29. Si el 1% de un gramo de uranio pudiera convertirse en calor, ¿cuántas calorías se producirían? (*Resp.* 2.15×10^{11} cal.)

36

RAYOS COSMICOS

Karl K. Darrow describió el tema de los rayos cósmicos como "único en la física moderna por lo diminuto del fenómeno, la delicadeza de las observaciones, las aventuradas expediciones de los observadores, la sutileza del análisis y la grandeza de sus deducciones".* Es imposible decir cuándo y por quién fueron estudiados por primera vez los rayos cósmicos. Desde la época del descubrimiento de la radiactividad por Becquerel (1896), y el radio por los Curie, desde sólo unos meses más tarde, muchos científicos han investigado los rayos radiactivos en el suelo, el aire y el espacio exterior. Extendiéndose durante un período de unos cincuenta años, estas investigaciones han llevado a algunos de los descubrimientos más interesantes e importantes sobre la estructura de los núcleos atómicos.

36.1 Primeros experimentos. Hace mucho que se sabe que un electroscopio cargado se descarga en poco tiempo sin importar lo bien aisladas que estén las hojas de oro. Considerando que los rayos de los materiales radiactivos pueden detenerse con una capa suficientemente gruesa de materiales pesados, Rutherford y Cooke (en el Canadá, 1903) rodearon un electroscopio con una pared gruesa de ladrillo y encontraron, sin embargo, muy poca disminución en la rapidez de la descarga. McLennan y sus colaboradores (también en el Canadá), bajaron un electroscopio al fondo de un lago esperando que la gruesa capa de agua detendría los rayos. Este ex-

perimento falló, igual que el anterior. En 1910, Glocker subió en un globo con un electroscopio a unos 5 kilómetros, a fin de alejarse de la radiación terrestre; pero, para su sorpresa, encontró que la rapidez de descarga no disminuía, sino que aumentaba cuanto más arriba ascendía. Este mismo efecto fue observado por Hess (en Austria, 1911) y Kolhörster (en Alemania, 1914). Subiendo hasta alturas de 8 kilómetros, estos observadores encontraron separadamente que la intensidad de los rayos desconocidos se hacía más fuerte a medida que se elevaban. A Hess se le adjudica el descubrimiento de los rayos cósmicos porque en una de sus publicaciones científicas referentes a estos resultados, sugirió la posibilidad de que estuviera entrando a la atmósfera terrestre alguna clase de rayos penetrantes, procedentes del espacio exterior. Por esta razón se le confirió el Premio Nobel de Física en el año de 1936.

36.2 Descubrimiento de Millikan y Bowen. Poco después de la Primera Guerra Mundial (1922), R. A. Millikan, con la ayuda de I. S. Bowen, construyó varios electroscopios de filamento con registro automático. Usando la experiencia que adquirieron con globos sonda durante la guerra, mandaron estos electroscopios a la estratosfera, atando cada uno de ellos a dos de dichos globos. Como se ve en la fig. 36A, el electroscopio de cuerda E consiste en dos filamentos de cuarzo revestidos de oro, aislados y montados con sus extremos unidos. Los filamentos se separan cuando están cargados, debido a la repulsión mutua, y al descargarse se acercan lentamente.

* Estas frases han sido tomadas de una monografía sobre rayos cósmicos por Karl K. Darrow, físico norteamericano y escritor contemporáneo sobre física moderna de los Laboratorios de la Compañía Telefónica Bell.

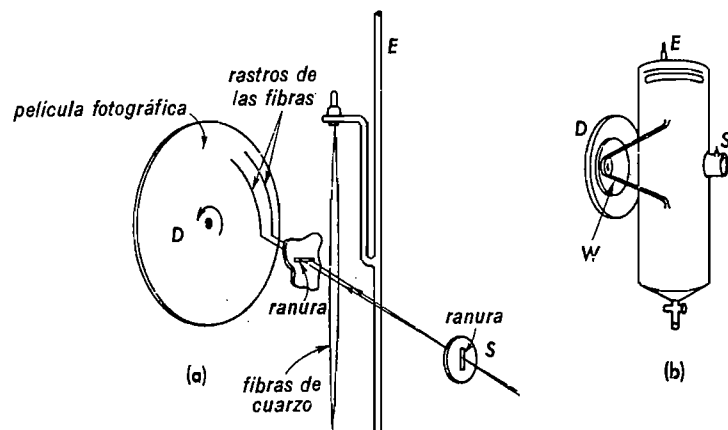


Fig. 36A. Uno de los electroscopios sensibles lanzados a la estratosfera por Millikan y Bowen para medir los rayos cósmicos. (a) Esquema; (b) dibujo a escala del instrumento completo de 15 cm de altura.

La luz del día que pasa a través de la estrecha ranura vertical *S* de la caja del instrumento, proyecta una sombra de la sección central de los filamentos sobre un disco giratorio *D* que tiene una película fotográfica. Conforme gira lentamente la película y los filamentos se acercan entre sí, dejan una huella doble, como se ve en el diagrama. Se registra sobre la misma

película la altura indicada por un manómetro y la temperatura de un pequeño termómetro. La película se mueve por el reloj *W*, pesando todo el aparato sólo unos 200 g. En uno de los vuelos a mayor altura, se reventó uno de los globos a los 16 km, pero el otro trajo los instrumentos a tierra en buenas condiciones. Igual que los primeros resultados obtenidos por otros

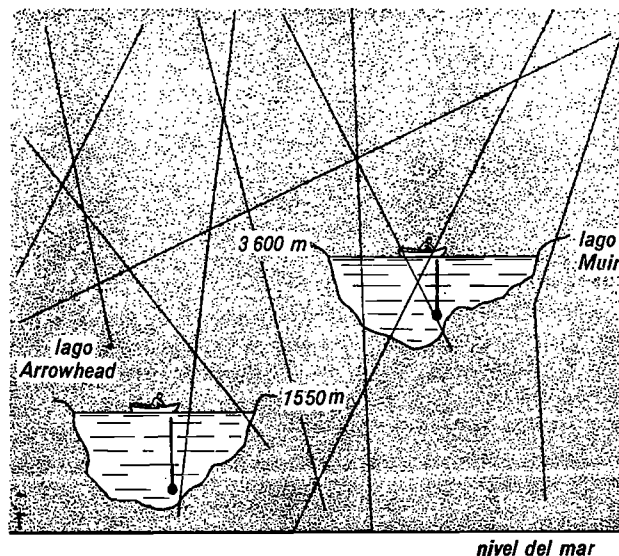


Fig. 36B. Descenso de electroscopios registradores automáticos en lagos profundos (alimentados por nieves fundidas) para medir la absorción de los rayos cósmicos en el agua.

experimentadores, Millikan y Bowen encontraron que la ionización aumenta con la elevación. Habiendo ampliado a mayores alturas las observaciones de los investigadores anteriores, Millikan y Bowen expresaron su opinión de que los rayos venían del espacio interestelar.

36.3 La penetración de los rayos cósmicos. A fin de determinar la naturaleza de los nuevos rayos, Millikan y sus colaboradores, Otis, Cameron y Bowen, a finales de 1922, empezaron un extenso estudio de la potencia de penetración de los rayos cósmicos. Ya que éstos atraviesan nuestra atmósfera de muchos kilómetros de aire, ¿cuánto penetrarán bajo el nivel del mar?

Se bajaron electroscopios registradores automáticos a varias profundidades en lagos alimentados por el deshielo de la nieve, como se ve en las ilustraciones de la fig. 36B. Las medidas tomadas en el lago Arrowhead, en el sur de California a una elevación de 1500 m, coincidieron aproximadamente con las que se tomaron en el lago Muir, cerca del monte Whitney (a una altura de 3600 m), si se toma en cuenta el mayor recorrido de 2 km en el aire que equivalen, en peso, a 1.80 metros de agua. Conforme penetran los rayos cósmicos bajo la superficie líquida, disminuye su número, hasta que a una profundidad de 30 metros se reduce la intensidad a un diezmilésimo de la que tenía en la superficie. Con electroscopios muy sensibles se han detectado rayos cósmicos capaces de penetrar hasta 600 metros de agua. Ésta es una potencia de penetración mucho mayor que la que tienen los rayos X conocidos o los rayos γ .

36.4 El tubo contador Geiger Mueller. Hay varios aparatos de uso común para observar y medir los rayos cósmicos. Estos son:

electroscópicos,
cámaras de niebla,
cámaras de burbujas,
contadores Geiger Mueller,
contadores de centelleos,
medidores de ionización,

emulsiones fotográficas,
semiconductores,

El tubo contador Geiger Mueller, que lleva el nombre de sus inventores, es uno de los instrumentos eléctricos más simples que se hayan inventado (véase la figura 36C). Consiste en un cilindro de cobre

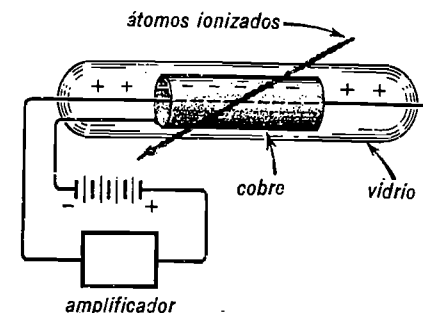


Fig. 36C. El tubo contador Geiger Mueller.

abierto en sus extremos, de 3 hasta 7.5 centímetros de largo, montado dentro de un tubo de vidrio de paredes delgadas y un alambre fino y tenso de wolframio a lo largo del eje del cilindro. Después de que se ha hecho el vacío parcial al tubo (es conveniente una presión entre 5 y 10 cm de mercurio), se aplica un potencial de unos 1000 voltios, con el positivo conectado al alambre central y el negativo al cilindro de cobre.

Cuando pasa por el tubo Geiger Mueller un solo rayo cósmico o una partícula a gran velocidad, procedente de una fuente radiactiva, la liberación de los electrones de las moléculas de aire, crea iones. Estos electrones liberados son atraídos por el alambre cargado positivamente y se mueven hacia él, adquiriendo por sí mismos en una distancia muy corta una velocidad elevada. Debido a esta velocidad, pueden ionizar también otros átomos, liberando así más electrones. Esta multiplicación de las cargas se repite por sí misma en sucesión rápida, produciendo en un intervalo de tiempo muy corto, un *alud de electrones hacia el alambre central*. Esta brusca aparición de cargas es equivalente al flujo

de un pequeño impulso de corriente a lo largo del circuito eléctrico. Cuando se ha intensificado esta corriente por medio de un amplificador, se puede hacer operar un interruptor eléctrico, un altavoz de radio o cualquier clase de aparato eléctrico.

Con mucha frecuencia se hace que los impulsos del tubo Geiger Mueller hagan trabajar un pequeño aparato contador. Así cada partícula de rayos cósmicos que pasa por el tubo, es contada automáticamente. El número contado cada segundo depende de las dimensiones del tubo. Un tubo de 2.5 cm de diámetro y varios centímetros de largo, al nivel del mar, cuenta de 50 a 100 por minuto.

Para observar la dirección de la mayor intensidad de rayos cósmicos, se usa un telescopio de rayos cósmicos. Este telescopio se hace conectando dos o más tubos Geiger Mueller en *coincidencia*, y montándolos en un mismo soporte con cierta distancia de separación. Los tubos en coincidencia se conectan en tal forma que fluirá una corriente en el circuito eléctrico complementario sólo cuando se descarguen los dos tubos a un mismo tiempo.

Cuando se montan los tubos, uno sobre el otro, como en la fig. 36D(a), un rayo

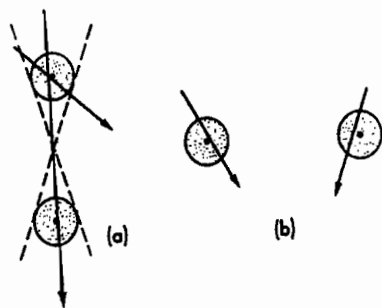


Fig. 36D. Dos contadores Geiger forman un telescopio de rayos cósmicos conectados en coincidencia.

cósmico que pase a través de los dos cilindros hará que fluya una corriente y se registre un recuento. En cambio si pasa una partícula por uno, pero no por el otro, no se registra ninguna cuenta. Los experimentos al nivel del mar muestran que, al montar el telescopio en la posición hori-

zontal (b), se obtienen pocos recuentos; mientras que, cuando se monta en la dirección vertical, se registran muchos tantos. La interpretación que se da a esto es que los rayos cósmicos vienen principalmente de arriba.

36.5 La cámara de niebla de Wilson. Una aplicación importante del aparato Geiger Mueller es colocar una cámara de niebla de Wilson entre dos tubos contadores Geiger, como se ve en la fig. 36E, y así tomar una fotografía de cada rayo

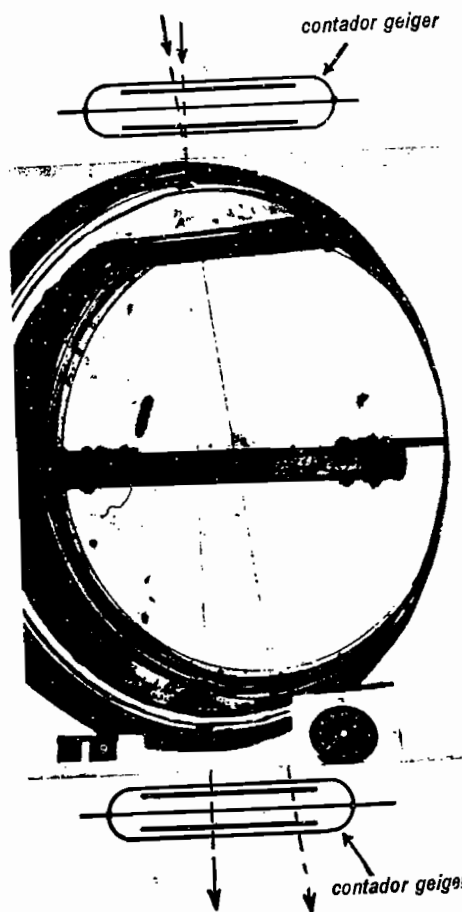


Fig. 36E. Cámara de niebla de Wilson montada entre dos contadores Geiger conectados en un circuito de coincidencia. Así se hace que los rayos cósmicos tomen su propia fotografía. (Según Brode.)

cósmico. Se hacen automáticamente miles de tales fotografías haciendo que cada uno de los rayos tome la propia. Esto se logra haciendo que la corriente eléctrica repentina de los dos tubos contadores, producida por el paso de un rayo único, abra y cierre el disparador de la máquina fotográfica, y al mismo tiempo haga que la cámara de niebla se expanda, y prenda una lámpara de destellos que ilumine la huella de niebla que se forma.

En la fig. 36E cualquiera de los rayos cósmicos dispara los accesorios eléctricos y toma la fotografía. Debe notarse que los dos rayos pasaron a través de la placa de 1.25 cm de plomo sin ser desviados. Las fotos de la cámara, no son fotografías de los rayos cósmicos, sino de las trayectorias recorridas por estos rayos.

36.6 Rayos cósmicos primarios y secundarios. Las observaciones experimentales hacen ver que los rayos cósmicos que entran a nuestra atmósfera están compuestos casi exclusivamente por núcleos atómicos de carga positiva. Las dos terceras partes de estos rayos cósmicos llamados *primarios*, son protones, y de la otra tercera parte (calculada en masa), un 90% son partículas α y un 10% son núcleos más pesados, como carbono, nitrógeno, oxígeno, hierro, etc.

Al entrar en la atmósfera, una partícula primaria de gran energía, choca pronto con otro núcleo atómico, rompiéndose una o las dos partículas en varios fragmentos nucleares más pequeños, cada uno de los cuales lleva algo de la energía de la partícula primaria. Estas partículas de velocidad elevada, chocan a su vez con otros núcleos, dividiendo más su energía para producir otras partículas muy rápidas. Todas estas partículas, exceptuando las primarias, son llamadas *rayos cósmicos secundarios*.

Uno de los resultados de choques de los rayos cósmicos, es la creación de rayos y de alta frecuencia y gran penetración. Estos fotones también están incluidos en la clasificación de *rayos cósmicos secundarios*. A una altura de unos 25 kilómetros, existen de 10 a 15 veces más rayos cósmicos secundarios que el número de rayos

primarios que entraron en la atmósfera. A esta altura, donde quedan por debajo más de las nueve décimas partes de la atmósfera terrestre, se observa que el número de rayos en movimiento horizontal es igual a los que se mueven verticalmente. Del diagrama presentado en la figura 36F resulta bastante claro el motivo de que sean difícil distinguir los primarios de los secundarios, que tienen un número mucho mayor.

A menores alturas disminuye la intensidad total, ya que muchos de los rayos secundarios producidos arriba son detenidos por los choques. En otras palabras, se pierde tanta energía por las colisiones sucesivas que la energía es absorbida gradualmente como movimiento térmico de las moléculas de aire. Cuando llegan al nivel del mar, los rayos que quedan consisten principalmente en unos pocos secundarios y primarios de gran velocidad. Aun al nivel del mar algunos de ellos tienen suficiente energía para penetrar varios centímetros y hasta miles de metros en la tierra y en el agua.

Debe recordarse que entre las colisiones del tipo indicado en la fig. 36F, cada

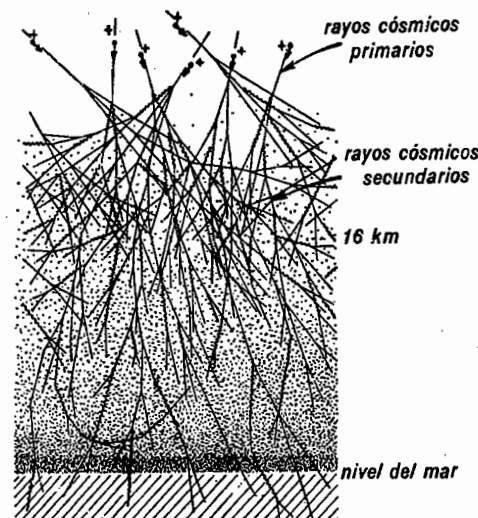


Fig. 36F. Rayos cósmicos primarios produciendo los secundarios al entrar en la atmósfera de la tierra.

partícula de rayos cósmicos está siendo frenada continuamente al *abrirse paso* entre miles de moléculas de aire al ir liberando electrones y produciendo iones. Estos últimos son los que forman las gotas de niebla que revelan las trayectorias dentro de la cámara de Wilson.

Aunque los rayos γ también pierden energía en los choques con los átomos para producir los electrones Compton, dichos rayos no dejan huellas visibles en la cámara de niebla de Wilson. La razón de esto es que las colisiones son pocas y muy distanciadas, y las gotas de niebla que se forman quedan muy separadas entre sí.

36.7 Descubrimiento del positrón. El positrón, o electrón positivo, fue descubierto en 1932 por Anderson, fotografiando huellas de rayos cósmicos en una cámara de niebla de Wilson. Bajo la influencia de un campo magnético intenso aplicado perpendicularmente a una cara de la cámara de niebla, las partículas con carga positiva deben desviarse hacia la derecha y las que tienen carga negativa hacia la izquierda.

A fin de asegurarse de que aquellas que se desviaron para un lado no eran las que venían de arriba, y las que se inclinaron hacia el otro lado no eran partículas de la misma clase y la misma carga

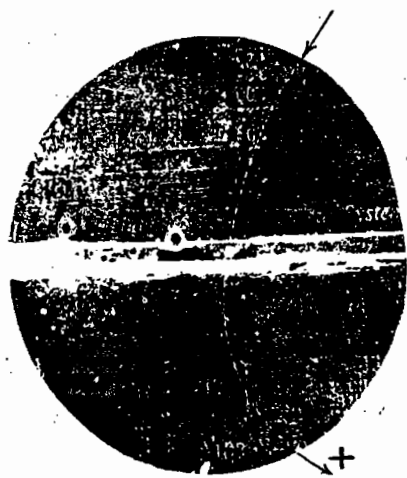


Fig. 36G. Fotografía de un positrón en la cámara de niebla de Wilson.

que vinieran de abajo. Anderson insertó una placa de plomo en la cámara, para frenar las partículas. En estas condiciones fueron obtenidas fotografías semejantes a las que se ven en la fig. 36G. Así pudo estar seguro Anderson, por la curvatura de la huella en cada lado del plomo, que la partícula entraba del lado de arriba, porque al pasar a través de la placa de plomo sólo podía hacerse frenando y no era posible que se acelerasen.

Conociendo la dirección del movimiento, la dirección del campo y la dirección de la desviación, Anderson llegó a la conclusión de que esta partícula tenía una carga positiva. Comparando esta huella con los rastros de electrones y de partículas α , ya bien conocidos, llegó a la conclusión de que la nueva partícula tenía una masa semejante a la del electrón. Los experimentos posteriores siguieron dando más pruebas de la existencia de un electrón positivo. Ahora se pueden producir haces intensos de positrones en el laboratorio. Anderson recibió el Premio Nobel de Física en 1936 por su descubrimiento del positrón.

36.8 Creación de pares de electrones. Poco después del descubrimiento por Anderson del positrón, J. R. Oppenheimer intentó calcular las condiciones en que podía existir el positrón en la naturaleza. De la teoría cuántica del electrón, propuesta antes por D. Dirac, llegó a predecir que, si se hacía pasar cerca del núcleo de un átomo un fotón de gran energía, es decir, un rayo γ de alta frecuencia, el campo eléctrico del núcleo sería capaz de aniquilar el rayo γ y crear en su lugar un par de partículas, un electrón y un positrón. Preveía la teoría que estas dos partículas debían tener la misma masa y cargas iguales, pero opuestas. En la figura 36H se ve un esquema de la producción del par.

Blaukett, Anderson y otros, buscaron estos pares en la cámara de niebla y pronto los encontraron, exactamente como se había predicho. Se observó que, al pasar por la materia, los rayos γ que ve-

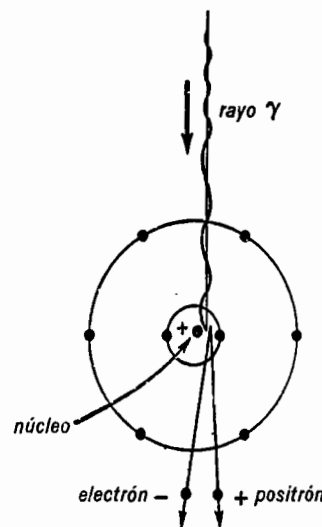


Fig. 36H. Producción de un par.

nían de un elemento radiactivo, como el *torio C'*, producían pares de electrones. En la fig. 36I se observa uno de éstos.

Cuando se crea un par de electrones, las leyes de la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento, requieren que las dos partículas se muevan casi en

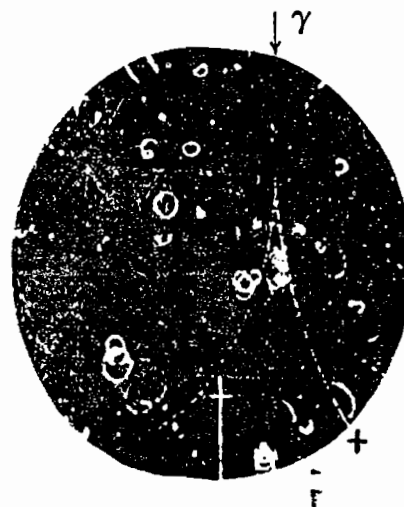


Fig. 36I. Un rayo γ , entrando a la cámara de niebla desde arriba, crea un par de electrones, uno (+), el otro (-). (Según Lauritsen y Fowler.)

línea recta hacia adelante. Si no se tiene aplicado algún campo magnético a la cámara de niebla, las partículas avanzan una junto a la otra en trayectorias casi paralelas; pero si existe un campo magnético, el camino del positrón se desvía hacia un lado y el del electrón hacia el otro.

La razón de que no se descubrieran antes los positrones, en la historia de la física, es que no duran mucho tiempo en estado libre. Tan pronto como un posi-

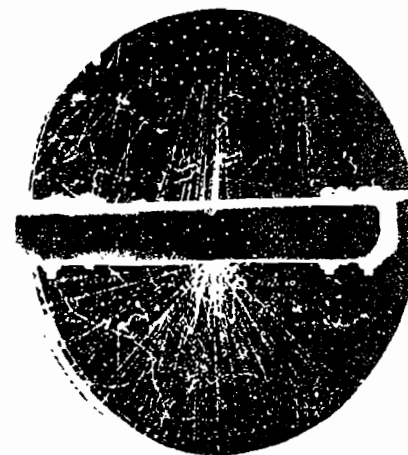


Fig. 36J. Fotografías de cámara de niebla de chubascos de rayos cósmicos. (Cortesía de R. B. Brode y D. D. Anderson y la Physical Review.)

trón encuentra a un electrón, los dos son aniquilados.

La experiencia indica que todos los positrones y positrones giran sobre un eje propio que pasa por su centro de masa. Hay pruebas convincentes de que, cuando un positrón y un electrón se acercan uno al otro, se combinan girando uno alrededor del otro como una estrella doble, con los ejes de rotación paralelos entre sí. A estos pares se les llama ahora *positronios*.

El positronio tiene una vida muy corta porque pronto se desintegran completamente las dos partículas y se crean en su lugar rayos γ . Si las dos partículas están girando en el mismo sentido, se desinte-

gran produciendo tres rayos γ de diferente energía; mientras que si estaban girando en direcciones opuestas, aparecerán dos rayos γ .

36.9 Chubascos de rayos cósmicos. Entre cientos de fotografías de rayos cósmicos tomadas en cámaras de niebla, el experimentador encuentra ocasionalmente una foto de un chubasco de rayos cósmicos. En lugar de encontrar una o dos huellas en la fotografía, en estas ocasiones se encuentran docenas o cientos de rastros, como se ve en la fig. 36J.

En la Fig. 36K se tiene una prueba directa de que estos chubascos tienen por origen una sola partícula de alta energía. Aquí, en una cámara con cinco placas de plomo espaciadas regularmente, se ve un chubasco relativamente grande creciendo de una, o quizá dos, partículas que hay en la parte superior. Además de aumentar el número de partículas de este torrente con cada placa de plomo que atraviesan, la poca separación de las huellas indica que las partículas nuevas salen moviéndose en dirección casi igual y

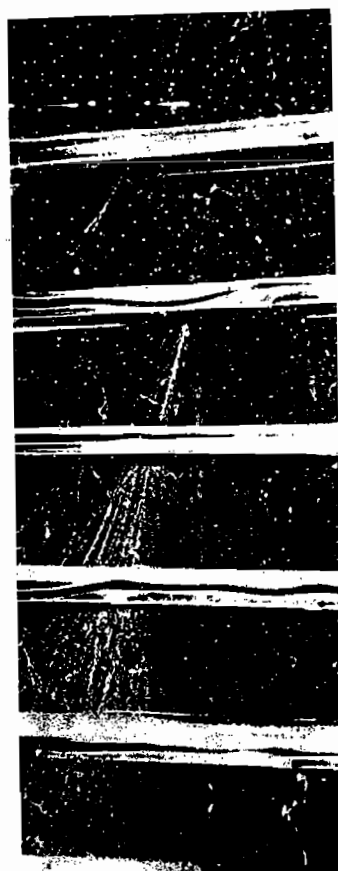


Fig. 36K. Fotografía del crecimiento de un rayo cósmico en cascada en cinco capas de plomo. (Tomado en Monte Evans, Colorado por W. Powell.)

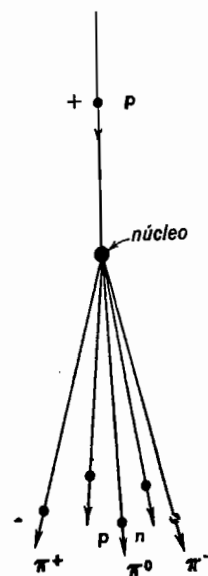


Fig. 36L. Los rayos cósmicos primarios producen mesones π por choques nucleares.

siempre avanzando. En esta fotografía se observa en el pequeño espacio de unos cuantos centímetros, el proceso que en la fig. 36E requiere varios kilómetros de aire.

36.10 Los mesones. Anderson y Nedermeyer descubrieron en 1938, en los rayos cósmicos, la presencia de partículas cargadas que tienen una masa cientos de veces superior a la masa de un electrón, pero sin embargo, más ligeras que el protón. Estas partículas, llamadas ahora *mesones*, son de varias clases, y se sabe por datos experimentales tomados por globos y aeroplanos, que la mayoría de ellos se producen en las capas superiores de la atmósfera por los choques de los rayos cósmicos con los núcleos atómicos del aire.

En estos choques, se producen mesones π cargados positiva y negativamente, junto con mesones π neutros, protones y neu-

trones, como se ve en la fig. 36L. Los mesones π con masa de cerca de $270 m_e$, junto con otras partículas nucleares, se mueven hacia adelante con velocidad cercana a la de la luz (m_e = masa de un

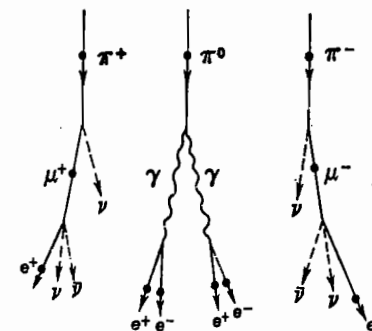


Fig. 36M. Los mesones π se desintegran en mesones μ , rayos γ , electrones y neutrinos.

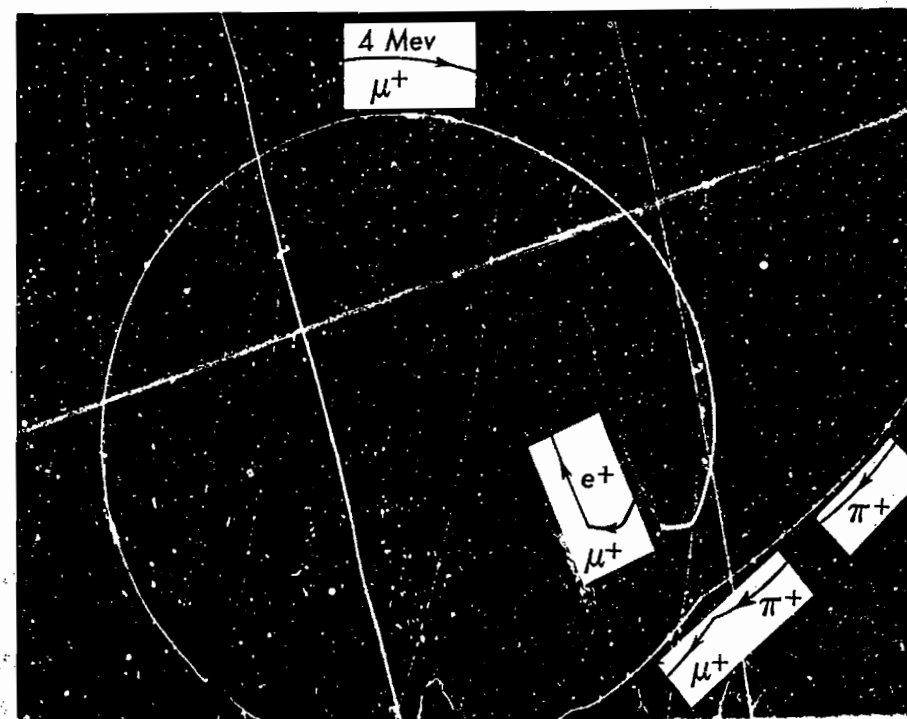


Fig. 36N. Fotografía de cámara de niebla de Wilson en un campo magnético de 8 000 gauss. Se ve la desintegración de un mesón π en un mesón μ y del mesón μ en un positrón.

electrón). El nombre de partículas nucleares se aplica aquí sólo a aquellas partículas que se cree que existen en el núcleo de los átomos, es decir, protones, neutrones, deuterones y partículas α .

La posible existencia y desintegración espontánea de los mesones, fue predicha primero por Yukawa * en 1935, y fotografiada por primera vez por Williams y Roberts en 1940. Todos los mesones π cargados, parecen tener una media vida de 2×10^{-8} seg, y cada uno se desintegra en un mesón μ cargado y en una partícula neutra ligera llamada neutrino. El mesón μ cargado, a su vez se desintegra con una media vida de 2×10^{-6} seg, en un electrón y dos neutrinos, como se ve en la fotografía de la fig. 36N.

El neutrino n_0 es una partícula sin carga que no ha sido observada ni descubierta directamente aún por nadie; pero que ha sido introducida por los físicos a fin de explicar los fenómenos nucleares respetando las leyes fundamentales de la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento.

Los mesones π sin carga son muy inestables. Se desintegran en dos rayos γ , con una media vida menor de 10^{-14} seg. Estos rayos γ crean en la atmósfera superior, chubascos de electrones en cascada, por la producción de *pares de electrones y de frenado (bremsstrahlung)*. Véanse las figuras 36H y 33K. Muchos de los mesones μ cargados, con su masa cercana a $207 m_e$, atraviesan la atmósfera antes de desintegrarse y llegan a la superficie de la Tierra.

* Yukawa, *Proceedings Physical and Math. Society*, Japón, 17, 48, 1935.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Quién descubrió los rayos cósmicos? ¿Cómo varía la intensidad de los rayos cósmicos conforme se asciende por el aire sobre la superficie de la Tierra?

2. ¿Qué clase de detectores se usaron en los primeros experimentos con rayos cósmicos? Nombrar otros seis detectores y aparatos medidores.

Al nivel del mar, los rayos cósmicos cargados están compuestos un 70% por mesones μ y un 29% de electrones y positrones, con cerca de 1% de partículas más pesadas, del tipo de protones, deuterones, partículas α , etc.

Al atravesar la materia sólida, los mesones π cargados negativamente, son frenados con frecuencia hasta velocidades tan bajas que, al encontrarse con un núcleo, son atraídos por su carga positiva y son capturados. En este proceso la masa del mesón se transforma en energía que excita al núcleo a un estado tal que, literalmente, estalla disparando varias partículas pesadas, protones deuterones, partículas α , etc.



Fig. 36O. Estrella en emulsión fotográfica, de la explosión de un núcleo producida por la captura de un mesón π lento.

La fig. 36O presenta una de estas *estrellas* en una emulsión fotográfica.

Los estudios recientes de rastros producidos en emulsiones fotográficas y en cámaras de niebla indican la presencia de un número de partículas atómicas diferentes. En el Capítulo 40 se da una breve información sobre estas *partículas elementales*.

3. ¿Cómo se hace que los rayos cósmicos tomen su propia fotografía?

4. ¿Qué son los rayos cósmicos primarios? ¿De qué están compuestos?

5. ¿Qué son los rayos cósmicos secundarios? ¿De qué están compuestos?

6. ¿Qué son los positrones? ¿Quién los descubrió? ¿En qué se parecen los positrones y los electrones?

7. Hacer un diagrama de un tubo contador Geiger Mueller y explicar brevemente cómo funciona como detector de partículas atómicas de alta velocidad.

8. Hacer un diagrama de cómo varía la intensidad de los rayos cósmicos conforme se asciende en la atmósfera superior. Hacer la gráfica de la altura en el eje horizontal y la intensidad en el vertical.

9. ¿Cómo supo Anderson, en su descubrimiento del positrón, que el rastro era producido por una partícula cargada positivamente viniendo de arriba y no un electrón ordinario viniendo de abajo?

10. ¿Qué se entiende por *producción de pares*? Describir este proceso brevemente. ¿Qué ocurre finalmente con los positrones?

11. ¿Qué es el positronio? Explicar qué ocurre finalmente con estas partículas atómicas.

12. ¿Qué es un chubasco de rayos cósmicos? ¿Qué clase de partículas se cree que inician y crean los chubascos de electrones en cascada?

13. Hacer una lista de las distintas clases de mesones. Dar: a) su carga, y b) su masa relativa.

14. Hacer una lista de todas las partículas atómicas que conozca que tengan masa igual o menor que una partícula α .

15. Suponiendo que toda la energía de un rayo γ se pudiera usar para crear un par de electrones (un positrón y un electrón), ¿cuál debe ser su frecuencia? Ver la ec. (35f). (*Resp.* 2.48×10^{20} vib/seg.)

16. ¿Cuál es la energía mínima, en voltios, que debe tener un rayo γ para producir un par de electrones? Ver la ec. (35f).

17. Cuando se combina un positrón con un electrón y son aniquilados los dos, ¿cuál es la frecuencia de los dos rayos γ producidos? Usar la ec. (35f). (*Resp.* 1.24×10^{20} vib/seg.)

ACELERADORES ATOMICOS

37.1 El experimento Cockcroft-Walton. Creyendo que se podría lograr la desintegración del núcleo atómico usando como proyectiles otras partículas distintas de las α , Rutherford propuso en 1930 la construcción de un generador de corriente continua de alta tensión en el Laboratorio Cavendish. El propósito de esta fuente de potencial de millones de voltios era acelerar núcleos de hidrógeno, o sea protones, a grandes velocidades y luego hacer que bombardearan a sustancias conocidas. Esperaba producir de este modo varias formas nuevas de desintegración.

Impacientándose con el progreso relativamente lento del difícil proyecto, Rutherford sugirió a Cockcroft y Walton que mientras tanto probaran con voltajes menores, para ver si por casualidad tenía lugar alguna desintegración. En 1932, Cockcroft y Walton anunciaron que habían desintegrado átomos de litio con protones acelerados con tensiones relativamente bajas. En la fig. 37A se presenta un esquema de su aparato.

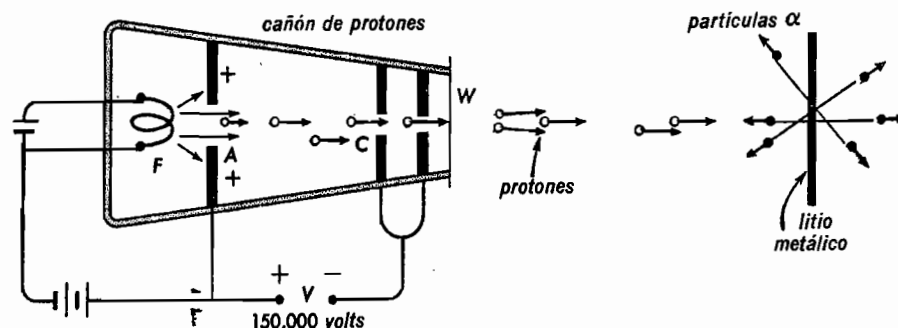
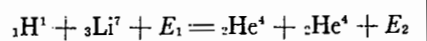


Fig. 37A. Experimento Cockcroft-Walton. El litio es desintegrado por protones de 150 000 voltios.

Los electrones del filamento caliente, F , pasan a través de hidrógeno en la región A , ionizando muchos átomos del mismo. Estos protones con su carga positiva, son acelerados entonces hacia el otro extremo del tubo, por un potencial V de 150 000 voltios. Al pasar por la abertura C y la ventana W , salen de la cámara de aceleración como un estrecho haz de protones.

Con este tubo, que funciona como un cañón de protones, se apunta a un blanco del litio metálico. Cockcroft y Walton observaron partículas α saliendo del metal con un alcance de 8 cm, y energía equivalente a 8.5 Mev. Considerando la energía relativamente baja de los protones incidentes, de sólo 0.15 Mev, esta liberación de energía atómica es tremenda. La transmutación que aquí ocurre, se escribe como sigue:



(37a)

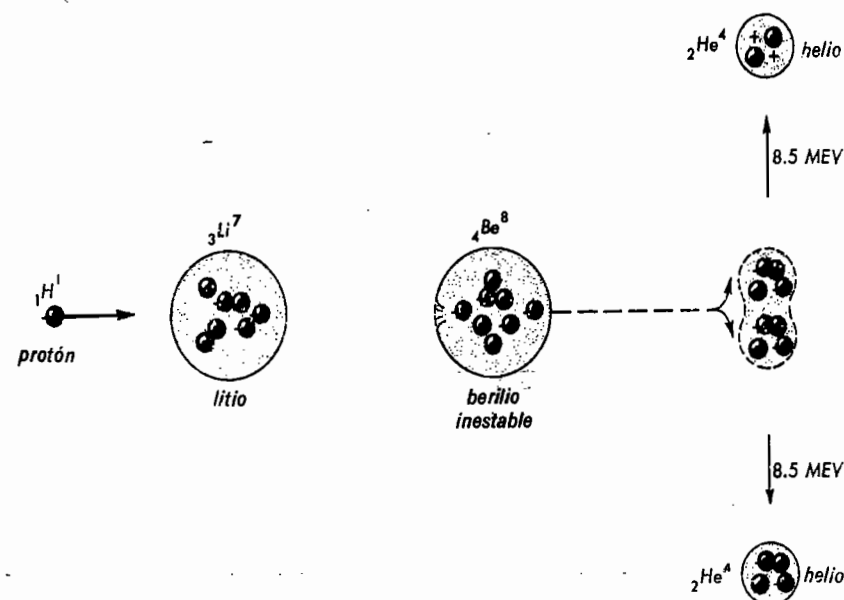


Fig. 37B. Desintegración de un núcleo de litio por un protón de 0.15 Mev de energía. Experimento de Cockcroft-Walton.

Esta reacción, ilustrada en la fig. 37B, presenta un protón ${}_1\text{H}^1$, de energía $E_1 = 0.15$ Mev, entrando a un núcleo de litio, ${}_3\text{Li}^7$, para formar un núcleo nuevo, pero inestable, de berilio, ${}_4\text{Be}^8$. Siendo inestable, esta estructura compacta de 8 partículas se rompe en dos partículas α , que se separan con gran energía. Ya que la energía medida de cada partícula α equivale a 8.5 Mev, cada desintegración comprende la liberación de 17.0 Mev de energía. La fuente de energía debe encontrarse en la aniquilación de una parte de la masa atómica total.

Se puede calcular la pérdida de masa con la tabla de masas atómicas, dada en el Apéndice IV. Anotando en dos columnas las masas que intervienen y sumándolas:

$$\begin{array}{rcl} {}_1\text{H}^1 & = & 1.0081 \\ {}_3\text{Li}^7 & = & 7.0182 \\ E_1 & = & 0.0002 \\ \hline & & 8.0265 \end{array} \quad \begin{array}{rcl} {}_2\text{He}^4 & = & 4.0039 \\ {}_2\text{He}^4 & = & 4.0039 \\ \hline & & 8.0078 \end{array} \quad (37b)$$

E_1 es el equivalente en masa de la energía del protón incidente, y se obtiene di-

vidiendo 0.15 Mev por 931 —véase la ecuación (35j)—. La diferencia entre las dos sumas, $8.0265 - 8.0078 = 0.0187$ unidades atómicas de masa, representa la pérdida de masa producida por la desintegración. Cuando se multiplica por 931, da 17.4 Mev como la energía liberada, valor que está de acuerdo con el valor determinado experimentalmente de 17.0 Mev.

Podría pensarse que una desintegración como la descrita anteriormente puede usarse como fuente de energía, pero no ha sido posible hacerlo hasta ahora. Aunque en cada choque y desintegración nuclear se libera por lo menos cien veces más energía que la que se da al protón, se necesitan muchas partículas para producir unas pocas colisiones. En otras palabras, sólo un pequeño porcentaje de los proyectiles protón, chocan con los pequeños blancos nucleares al pasar a través de la materia. La mayoría son frenados por los choques con electrones y por la ionización de los átomos. El núcleo de litio como blanco dentro del litio metálico, presenta al pro-

yección de un protón un área millones de veces más pequeña que el espacio que queda entre los núcleos vecinos.

37.2: El ciclotrón de Lawrence. Mientras Cockcroft y Walton efectuaban sus primeros experimentos de desintegración, E. O. Lawrence,* físico norteamericano, estaba perfeccionando un nuevo tipo de acelerador atómico, llamado ciclotrón, que pronto llamó la atención de los principales físicos del mundo. Esta *ametralladora atómica* fue muy efectiva para producir proyectiles atómicos de gran velocidad para experimentos de desintegración, que pronto se construyó un ciclotrón nuevo y mayor, y se le puso en funcionamiento. En la actualidad, muchos de los principales laboratorios de física en el mundo tienen en lugar prominente un ciclotrón de tamaño considerable.

Uno de los ciclotrones que está en la Universidad de California, y que es llamado el *sesenta pulgadas*, es un instrumento capaz de producir haces intensos de protones, deuterones o partículas α con energía de 10, 20 y 40 Mev respectivamente. El propósito de estas partículas de gran velocidad, como se producen en

* Ernest O. Lawrence (1901-1958), físico experimental norteamericano. Recibió su primera educación en Dakota del Sur, obteniendo el título de Bachiller en Artes en la Universidad de Dakota del Sur en 1922, su grado de Maestro, en Minnesota, en 1923, y el Doctorado en Filosofía, en la Universidad de Yale, en 1925. Después de dos años como auxiliar en el National Research, fue ascendido, a la edad de 26 años, a Profesor Ayudante de Física en la Universidad de Yale. El siguiente año fue nombrado Profesor Asociado de Física en la Universidad de California, y en 1930 fue designado Profesor Titular. Habiendo construido el Laboratorio de Radiación en la misma institución, llegó a ser su director en 1936. En 1937 recibió el Premio Comstock, de la Academia Nacional de Ciencias; la Medalla Cresson, del Instituto Franklin y la Medalla Hughes, de la Sociedad Real de Londres. Lawrence fue miembro de la Academia Nacional de Ciencias y se le conoce principalmente por el invento y desarrollo del ciclotrón y su aplicación a la producción de radiactividad inducida. Por estos descubrimientos recibió el Premio Nobel en 1939. Durante la Segunda Guerra Mundial, dirigió uno de los principales proyectos de investigación, que llevó al aislamiento del uranio-235, usado en las bombas atómicas.

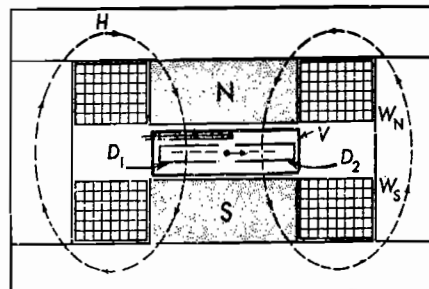


Fig. 37C. Sección transversal de un ciclotrón.

todos estos instrumentos, es someter varias sustancias conocidas a su *bombardeo* y así producir desintegraciones y transmutaciones de todas clases.

Aunque el funcionamiento de un ciclotrón grande requiere un complicado conjunto de aparatos y de equipo, los principios en que trabaja son muy sencillos. Como medio para explicar estos principios, se presentan en las figs. 37C y 37D diagramas de un ciclotrón.

El verdadero corazón del instrumento consiste en dos medios cilindros cortos y huecos, D_1 y D_2 , montados dentro de una cámara donde se ha hecho el vacío, entre los

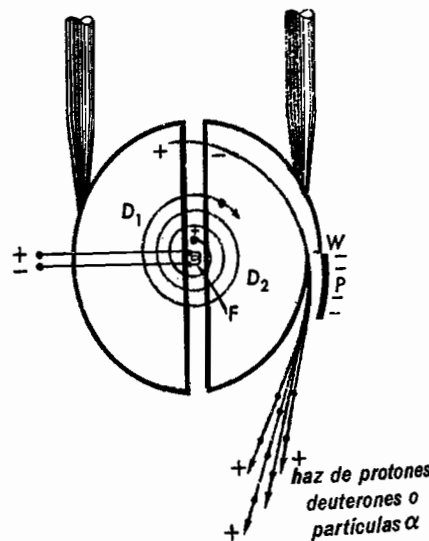


Fig. 37D. Elementos principales del ciclotrón.

polos de un poderoso electroimán, y conectadas por fuera a los dos bornes de un generador de corriente alterna de alta frecuencia. Es interesante señalar que este generador, en realidad, es un transmisor de radio de onda corta que proporciona energía a los electrodos de aceleración (des) (D_1 y D_2) en vez de mandarla a la antena. Cuando se admiten trazas de hidrógeno gaseoso en la cámara de vacío, el filamento caliente, F , ioniza algunos de los átomos de hidrógeno, produciendo los protones que se van a usar como balas atómicas. En el instante en que D_1 está cargada positivamente y D_2 está cargada negativamente, un protón que esté cerca de F se acelerará hacia D_2 . Al moverse dentro del intenso campo magnético del gran imán, esta partícula con carga positiva recorre una ruta circular, como se ve en el diagrama. Después de haber efectuado media vuelta, se invierte el potencial de manera que D_1 resulte negativa y D_2 positiva, el protón será atraído por uno y rechazado por el otro, haciendo que aumente su velocidad. Con la velocidad aumentada, se moverá en un arco de círculo mayor, como se ve. Después de esta segunda media vuelta, se vuelve a invertir el potencial, haciendo a D_1 positivo y a D_2 negativo, y nuevamente se acelera el protón. De este modo, conforme se invierte periódicamente el potencial, el protón viaja más y más aprisa, moviéndose en círculos cada vez mayores, hasta que llega a la orilla exterior y pasa a través de la estrecha ventana abierta, W .

Al salir por W , todos los protones deben pasar cerca de una placa P con carga negativa que, por atracción, rectifica sus trayectorias y los convierte en un haz definido de proyectiles. Entonces se coloca en el camino de este haz la sustancia que va a ser bombardeada, y los fragmentos desintegrados son estudiados por medio de varios aparatos detectores.

El principio fundamental que hace trabajar al ciclotrón, es el hecho de que el tiempo necesario para que una partícula

cargada efectúe una revolución completa dentro de las des, es el mismo, a cualquier velocidad. Mientras más aprisa avanza la partícula, más grande es el círculo que debe recorrer, conservándose constante su período. Así es que, con un abastecimiento de corriente alterna de frecuencia invariable, algunas partículas pueden estar empezando a acelerarse cerca del centro, mientras que otras más alejadas van adquiriendo velocidades mayores. El resultado es una corriente más o menos continua de protones que salen por la ventana W .

Si el voltaje de la corriente alterna que se aplica entre las des del ciclotrón es de 200 000 voltios, una partícula obtiene en cada media vuelta una velocidad adicional equivalente a 200 000 voltios. Si un protón efectúa 25 revoluciones completas antes de salir por W , habrá adquirido una velocidad equivalente a $200\,000 \times 25 \times 2$, o sea, 10 000 000 de voltios. Tenemos aquí, pues, un haz de protones de 10 Mev, obtenidos por la aplicación de un potencial cincuenta veces más pequeño.

Cuando el hidrógeno de la cámara de vacío del ciclotrón de 60 pulgadas, es reemplazado por *deuterio* y se dobla la intensidad del campo magnético, se obtiene un haz de deuterones de gran energía. Teniendo doble masa y la misma carga que los protones, estas partículas adquieren doble energía. Si se usa helio en lugar de deuterio, muchos de los átomos resultan doblemente ionizados en la fuente; y, después de la aceleración, emergen de la ventana del ciclotrón con una energía de unos 40 Mev. Aumentando o disminuyendo la frecuencia del potencial aplicado a las des y ajustando el campo magnético en forma apropiada, se pueden producir protones, deuterones y partículas α de 10, 20 y 40 Mev respectivamente.

Algunos de los detalles del ciclotrón, mostrado en las figs. 37C, 37D y 37E, son los siguientes: su dimensión, 60 pulgadas (150 cm), se refiere al diámetro de los polos del imán y del ciclotrón, y limita a su vez el tamaño de las des y por lo tanto la energía máxima disponible en los

fuerza de energía de 20,000 volts,
100,000 watts, 10 millones de
ciclos/seg de un transmisor
de radio de onda corta

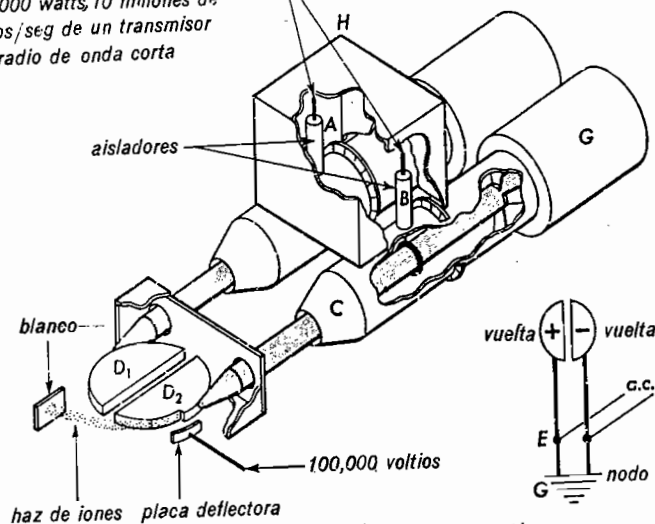


Fig. 37E. Montaje de las des, sus soportes, la placa deflectora y las conexiones eléctricas.

proyectiles atómicos; la mayoría del peso total del instrumento de 200 toneladas, corresponde al núcleo sólido, y a las piezas polares situadas dentro de los devanados del campo; estos últimos consisten en muchas vueltas de alambre grueso de cobre, y están encerrados en los depósitos W_s y W_n , a través de los cuales se hace

circular continuamente un fluido refrigerador.

El diagrama seccionado de la fig. 37E muestra los soportes de los electrodos de aceleración formados por largos tubos huecos fijos rigidamente y conectados a tierra por el extremo G. Las des que están suspendidas libremente, son puestas en oscila-



Fig. 37F. Fotografía de un haz de deuterones del ciclotrón de Harvard, tomada por Paul Donelson. (Cortesía de la Universidad de Harvard y de A. K. Solomon.)

ción eléctrica por el alto voltaje de corriente alterna que se les aplica a través de las uniones A y B, herméticas para el vacío.

Estas dos largas barras oscilan eléctricamente con un *nodo de voltaje* (potencial cero) en el extremo fijo G, y con un *vientre* (máximo) de voltaje en cada una de las des. Haciendo las conexiones en E, a una quinta parte de la distancia medida desde G, el máximo de potencial llega a ser en las des, aproximadamente 5 veces mayor que el máximo de la tensión aplicada. Las oscilaciones eléctricas son análogas a las vibraciones de las puntas de un diapason. El voltaje aplicado es aproximadamente de 20 000 voltios, mientras que en las des llega aproximadamente a 100 mil voltios. Esta elevación de la tensión es semejante en algunos aspectos a la que produce un transformador elevador.

En la fig. 37F se presenta una fotografía de un haz de deuterones de 11 Mev, producido en el ciclotrón de la Universidad de Harvard. Desde el punto en que salen de la ventana del ciclotrón que está en el centro a la izquierda hasta donde quedan en reposo en medio del aire, en la esquina inferior derecha, las partículas de gran energía ionizan las moléculas y los átomos del aire haciendo que emitan luz visible.

37.3 El generador Van de Graaff. Esta máquina construida en 1931 por R. Van de Graaff en la Universidad de Princeton, usa el principio del generador electrostático, descubierto hace muchos años. Una instalación típica, como la de la fig. 37G, consiste en una gran esfera hueca sostenida por columnas aislantes y que es cargada por una banda sinfín que trae cargas eléctricas de una batería y las deposita dentro de la esfera. La banda transmisor de tela, de 30 cm de ancho o más, corre sobre rodillos bien alineados y avanza a razón de 96 km/h.

Al pasar la banda entre la superficie metálica y la hilera de puntas en P, los electrones de las mismas saltan hacia el

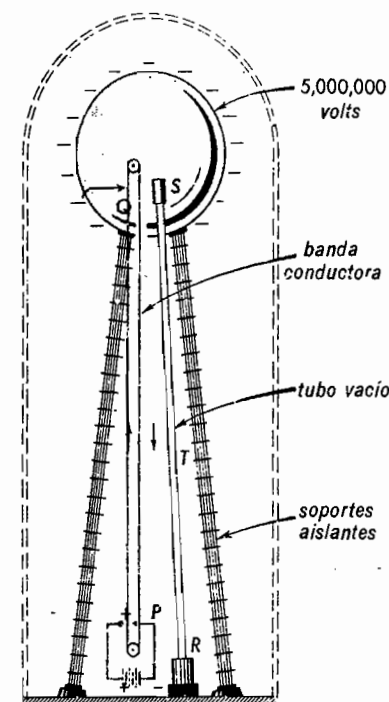


Fig. 37G. Generador Van de Graaff de alto voltaje.

electrodo positivo, y son recogidos por la banda. Al entrar ésta a la esfera en la parte superior, los electrones saltan a las puntas Q, de donde rápidamente van a la superficie exterior de la esfera. El *rociado* de los electrones desde la banda hacia unas puntas y desde las otras puntas a la banda, se asegura manteniendo elevado el potencial de la batería (50 000 voltios), para sostener una *descarga de escobilla*. Conforme llegan más electrones a la esfera, aumenta más su potencial negativo, hasta que las fugas hacia el aire circundante y a través de los aisladores son tan rápidas como la carga.

Las partículas atómicas que van a acelerarse, se generan en S, en un tubo de vacío, que está dentro de la esfera. Los electrones son acelerados para abajo, partiendo de la parte superior del tubo de vacío T, recto y largo. Al buscar el potencial de tierra, adquieren toda la energía

disponible del voltaje, y en la parte inferior se les hace bombardear el blanco que se está estudiando. Cuando se diseñan instalaciones para acelerar protones, deuterones, o partículas α , se invierte el potencial de la batería y la esfera adquiere un alto potencial positivo.

37.4 El betatrón. El betatrón, inventado en 1941 por D. W. Kerst en la Universidad de Illinois, es un acelerador de electrones capaz de producir haces electrónicos de gran energía y también rayos X de poder de penetración extremadamente elevado. Este ingenioso aparato difiere del ciclotrón por lo menos en dos aspectos fundamentales; primero, los electrones son acelerados por un campo magnético que cambia rápidamente, y segundo, la órbita circular de las partículas tiene un radio constante.

La fig. 37H es un corte transversal de un betatrón de 20 Mev. En medio de los polos de un electroimán, está montado un tubo de vidrio al vacío en forma de superficie toroidal (*dona*), que contiene un proyector de electrones. Se aplica a las bobinas una corriente alterna (180 ciclos/seg) que hace que algunas líneas magnéticas

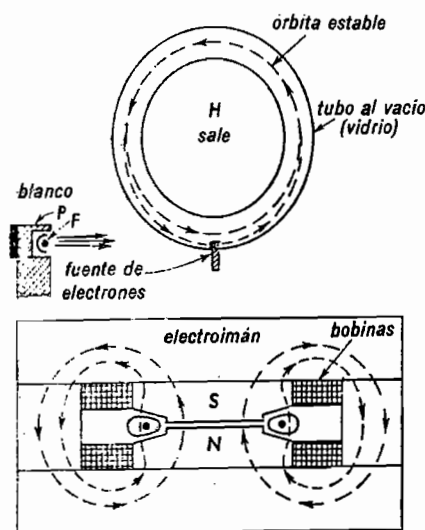


Fig. 37H. Sección transversal del acelerador de electrones, llamado betatrón.

atraviesen el tubo de vacío, por la órbita de los electrones y las demás líneas pasen hacia el centro de la órbita, como se ve abajo. Los electrones son inyectados sólo al principio de cada cuarto de ciclo, cuando los campos empiezan a aumentar en la dirección *hacia arriba*. El campo creciente a través del centro de la órbita, da lugar a una fuerza electromotriz, tangente a aquella que acelera los electrones, mientras que el campo creciente en la órbita es suficiente para aumentar la fuerza centrípeta y evitar que los electrones se salgan por una espiral. La estabilidad de dicha órbita se logra dando una configuración apropiada a las caras de los polos del imán, ajustando la frecuencia y la intensidad del campo magnético e inyectando los electrones al voltaje apropiado y en el momento oportuno.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la Compañía General Electric construyó un betatrón de 350 toneladas y lo puso a trabajar como fuente de rayos X extremadamente penetrantes. En este instrumento se aceleran electrones a 100 Mev de energía y, al chocar en el blanco, producen rayos X capaces de atravesar algunos metros de hierro o plomo sólido.

37.5 El acelerador lineal. No obstante que los aceleradores lineales se propusieron desde 1929 y se construyeron desde entonces varios de ellos, sólo han tenido éxito en los últimos años. Aplicando los principios de las guías tubulares de ondas y de las cavidades resonantes, L. Álvarez y sus colaboradores han construido en la Universidad de California un acelerador lineal de 12 m.

En la fig. 37I se presenta un corte transversal de una parte del aparato. Los protones son producidos inicialmente y acelerados a 4 Mev de energía por un generador Van de Graaff (ver la fig. 37G) y luego son inyectados con esa energía, en el extremo de una cámara alargada de 120 cm, como se ve arriba a la izquierda. Una vez dentro de la cámara, los protones son acelerados pasándolos a través de una serie de tubos de impulsión, y llegan al

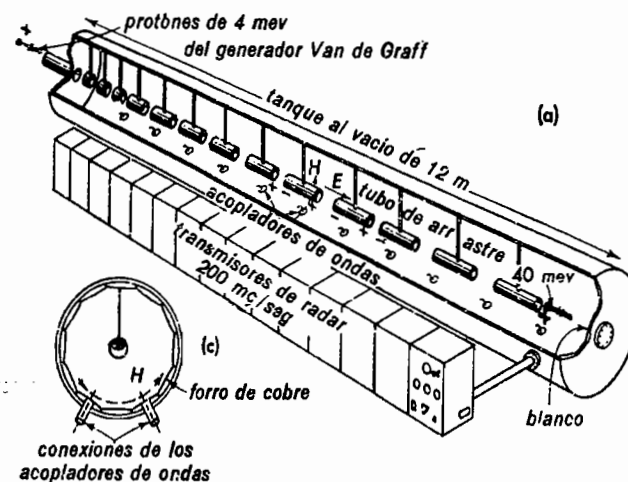


Fig. 37I. Sección principal de un acelerador lineal.

otro extremo con cerca de 40 Mev de energía.

El interior de la cámara con forro de cobre, alimentado por 30 osciladores transmisores de radar, se pone en resonancia en su *modo dominante* con una frecuencia de 200 megaciclos. Las condiciones de *onda estacionaria* producidas, son tales que el campo eléctrico E es paralelo al eje del tubo y aumenta y disminuye simultáneamente en todos los puntos. Las longitudes de los tubos de impulsión aumentan gra-

dualmente de manera que los protones cruzan cada intervalo cuando el campo E está a la derecha, y están dentro de los tubos en un lugar libre del campo eléctrico cuando éste está a la izquierda. Ahora parece factible, aunque no muy práctico, que se puedan agregar a este sistema otras secciones adicionales de la cámara para obtener casi cualquier energía deseada. Los cálculos indican que puede esperarse cerca de un Mev por cada 30 cm de longitud de este sistema.

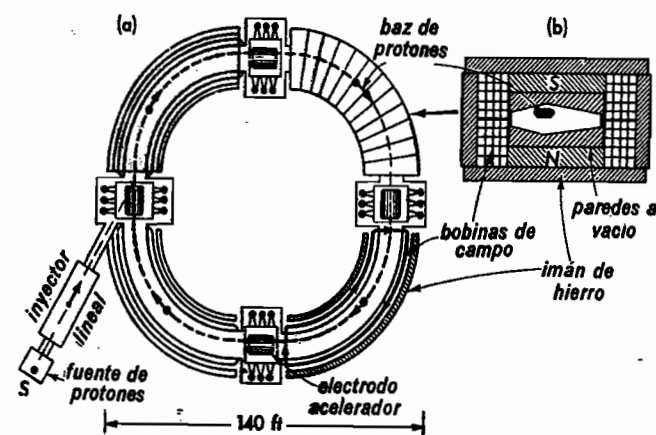


Fig. 37J. El betatrón de Berkeley, proyectado para producir protones de 6 Bev.

37.6 Aceleradores de miles de millones de electrón voltios. El diseño y la construcción de un aparato capaz de acelerar partículas, dándoles energías de miles de millones de electrón voltios (*Bev*),* exige resolver muchos problemas. Uno de ellos, que no es de los menores, es el factor económico, tanto en relación con el costo del instrumento como con su mantenimiento posterior.

Ahora hay varios aceleradores que están produciendo partículas de 1 millar de mi-

llones de electrón voltios (*Bev*), o más, y se están planeando otros de mayor energía.

En operación (1960)

Pasadena, California	1.1 Bev (electrones)
Ithaca, Nueva York	1.3 Bev (electrones)
Berkeley, California	6.2 Bev (protones)
Dubna, Rusia	10 Bev (protones)
Génova, Suiza	28 Bev (protones)
Brookhaven, N. York	31 Bev (protones)

Proyectados o en construcción

Cambridge, Mass.	7.5 Bev (electrones)
Argonne, Illinois	12.5 Bev (protones)
Palo Alto, Cal.	15-45 Bev (electrones)

* Bev significa billón de electrón voltios, ya que en Norteamérica y Francia, mil millones son un billón. En los demás países, el billón es un millón de millones. (Nota del traductor.)

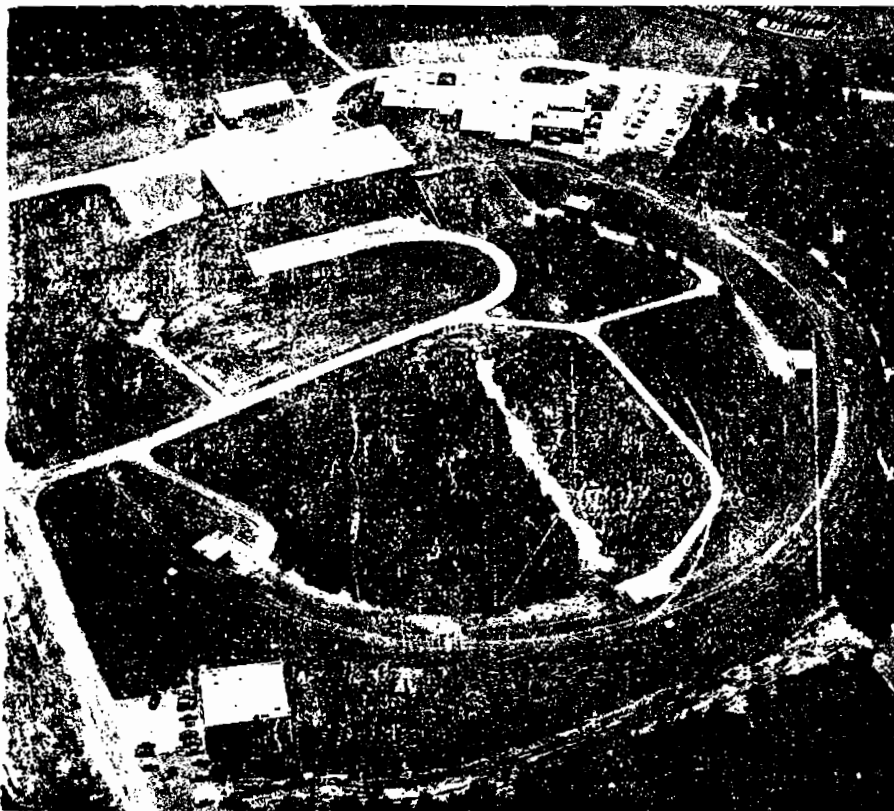


Fig. 37K. Foto aérea, en que se encuentra el gigantesco acelerador de protones de 31 Bev de Brookhaven, Long Island, Nueva York. El anillo de tierra arada cubre el propio anillo del acelerador, sirviendo el relleno de tierra para mantener constante la temperatura y como absorbente de la radiación dispersa indeseable. Comparar los carros estacionados para tener una escala de medida. (Cortesía de los Laboratorios Nacionales de Brookhaven.)

El esquema básico del más grande de estos instrumentos, el bevatrón, surgió de una proposición de W. M. Brobeck. El montaje de los imanes fue propuesto por H. R. Crane, y consiste en cuatro segmentos (en forma de cuadrantes) espaciados de manera que las órbitas de las partículas sean cuartos de círculo unidas por secciones rectas de 6 m. La potencia eléctrica proporcionada al imán de 10 000 toneladas, es producida por un motor generador provisto de un gran volante. Llega a tomarse del volante una potencia máxima de 100 000 kilovatios para almacenarla en el imán cuando se está creando el campo magnético. Cuando el campo magnético se reduce entre los impulsos del haz, el

generador funciona como motor y devuelve energía al volante.

Los protones que vienen de una fuente, que está en la parte inferior izquierda de la fig. 37J, son acelerados primero por un acelerador transformador de cascada Cockcroft-Walton, hasta 50 000 electrón voltios. Después de ser desviados por un campo magnético, son acelerados hasta 10 Mev por un acelerador lineal. A esta velocidad, son desviados de nuevo para hacerlos entrar a la verdadera pista de 115 m, donde alcanzan una velocidad equivalente a 6 Bev (seis mil millones de electrón voltios).

En la fig. 37K se muestra una fotografía del terreno en que se encuentra el mayor acelerador en operación hasta enero de 1962.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿En qué consistió el experimento de Cockcroft-Walton? ¿Cuál fue la interacción?
2. ¿De dónde viene la energía que hace que se rompa el litio con un crecimiento centuplicado de energía cinética?
3. ¿Qué es un ciclotrón? ¿Cuál es su propósito? ¿Qué es lo que acelera?
4. Hacer un diagrama de los elementos esenciales de un ciclotrón que emplea dos des. Rotular las partes esenciales. Indicar de dónde parten las partículas atómicas ionizadas y dónde emergen finalmente como un haz.
5. ¿Qué es el deuterio? ¿Son lo mismo el deuterio y el hidrógeno?
6. ¿Qué es un generador Van de Graaff? ¿Cuál es su uso más frecuente? ¿Puede usarse para acelerar protones y electrones?
7. Hacer un diagrama y explicar brevemente el generador Van de Graaff. Señalar las conexiones de la batería y los puntos de descarga, cómo deben arreglarse para cargar positivamente la esfera metálica.
8. ¿Qué es un betatrón? ¿De dónde le viene su nombre? ¿Para qué es usado?
9. ¿Qué es un acelerador lineal? ¿Cuál es su propósito? ¿De dónde le vino su nombre?
10. Hacer un diagrama y explicar brevemente la operación de un Bevatrón. Explicar su propósito y el origen de su nombre.
11. ¿Cuál es aproximadamente la más alta energía a que se han acelerado partículas atómicas en el laboratorio?
12. ¿Qué significado tiene la abreviatura Mev? ¿Qué significa la abreviatura Bev?

TRANSMUTACION DE LOS ELEMENTOS

38.1 Desintegración de protones y deuterones. Cuando se usan protones o deuterones de gran energía para bombardear diferentes elementos conocidos, se forman varios productos de desintegración. En la fig. 38A se ve un dispositivo experimental en que el ciclotrón actúa como fuente de partículas de alta velocidad. Para determinar la naturaleza de la desintegración

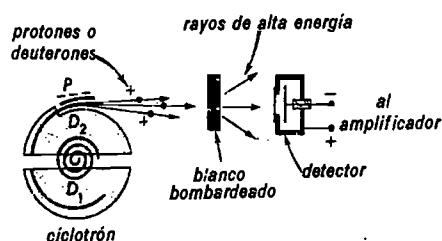


Fig. 38A. Montaje experimental usado para bombardear sustancias conocidas con deuterones de velocidad elevada procedentes del ciclotrón, y detectar los productos de desintegración usando una cámara de ionización.

que tiene lugar dentro de la sustancia que es bombardeada, se acostumbra identificar, mediante el uso de detectores apropiados, los rayos penetrantes que salen.

Muchos experimentos han demostrado que los productos de desintegración que deben buscarse pueden ser protones, partículas α , neutrones, rayos γ o también electrones, positrones y mesones. Para algunos de estos rayos penetrantes, puede ser más conveniente un detector que otro. Por ejemplo, el contador Geiger (ver la figu-

ra 36C), es especialmente útil para descubrir rayos γ o electrones, mientras que la cámara de niebla de Wilson y la cámara de ionización son útiles para localizar protones, partículas α o neutrones.

El detector que se ve a la derecha de la fig. 38A, representa una cámara de ionización poco profunda. Este aparato consiste en una pequeña caja de cobre llena de aire o de algún otro gas apropiado. Cuando pasa un protón o una partícula α a través de la ventana de lámina metálica muy delgada que está en el frente de la caja, produce muchos iones en el interior. Los iones positivos son atraídos hacia una placa con carga negativa, que está en el centro, donde produce pequeñas corrientes eléctricas, que van por el alambre a un tubo amplificador de radio. El amplificador a su vez puede usarse para hacer funcionar un aparato contador ultrarrápido. Se puede determinar la naturaleza y energía de las partículas que llegan, insertando diferentes laminillas de metal entre el blanco y el detector.

Cuando se usa la cámara de niebla de Wilson para identificar los productos de desintegración, se pueden identificar las partículas cargadas según la densidad de su huella de niebla y se puede determinar su energía por la curvatura que la acción de un campo magnético dé a los rastros. La fig. 38G lo indica en el caso de los positrones. Una vez que se conoce la naturaleza de los rayos que emergen de un blanco bombardeado, resultan también conocidos los productos residuales de la desintegración al escribir la reacción en forma

de ecuación. Se dan a continuación seis ejemplos de ecuaciones de estas reacciones.

Reacciones	Valores de Q
${}^1_1\text{H} + {}^9_4\text{Be} = {}^4_2\text{He} + {}^6_3\text{Li}$	8.1 Mev.
${}^1_1\text{H} + {}^{11}_5\text{B} = {}^4_2\text{He} + {}^8_3\text{Li}$	15.8 Mev
${}^2_1\text{H} + {}^{14}_7\text{N} = {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	13.6 Mev
${}^2_1\text{H} + {}^{16}_8\text{O} = {}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He}$	3.1 Mev
${}^2_1\text{H} + {}^7_3\text{Li} = {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$	5.0 Mev
${}^2_1\text{H} + {}^9_4\text{Be} = {}^{10}_5\text{B} + {}^1_0\text{n}$	4.4 Mev

Se acostumbra omitir en el primer miembro de todas las ecuaciones la energía de masa de la partícula incidente y expresar la energía total liberada con la desintegración, en la forma que se ve a la derecha. Los valores de Q, dados aquí, representan, por tanto, los valores experimentales de la energía adicional sobre la que trae el proyectil incidente.

Considérese la quinta reacción, que puede tomarse como la representación de un experimento en que se bombardea un blanco de litio metálico con deuterones de 2 millones de voltios procedentes de un ciclotrón. Por el otro lado del blanco aparecerá una corriente de protones de gran energía. Si éstos pasan a través de una cámara de niebla de Wilson dentro de un campo magnético, por ejemplo, se pueden identificar sus rastros como huellas de

protones y determinar que su energía es de 6.0 Mev, por la curvatura de los rastros. Los átomos de litio del blanco retroceden con unos 0.9 Mev aproximadamente. Cuando se toman en cuenta sólo las masas exactas de los cuatro núcleos que intervienen, hay una pérdida total de 0.0054 unidades atómicas de masa. Multiplicando por 931, esto es equivalente a 5.0 Mev de energía. Este valor sumado a la energía de la partícula bombardeadora incidente, da 7.0 Mev. La diferencia de energía de 1.0 Mev se va en rechazar el núcleo ${}^4_2\text{He}$ dentro del blanco.

Como segundo ejemplo, considérese la sexta reacción, en que los deuterones que bombardean al berilio metálico, producen neutrones de alta velocidad y núcleos rechazados de boro. Esta desintegración particular es importante porque se usa experimentalmente como un medio de obtener haces intensos de neutrones para usarlos como proyectiles en otras desintegraciones. En la fig. 38B se ilustran esquemáticamente los cambios nucleares que ocurren. La energía disponible sólo de la pérdida de masa equivale a 4.4 Mev; de manera que si se usan deuterones con energía de 7 Mev para bombardear el blanco del berilio, la energía disponible resulta cerca de 11.1 Mev, quedando 1 Mev en el núcleo de boro y rechazado, y aproximadamente 10.1 Mev en el neutrón.

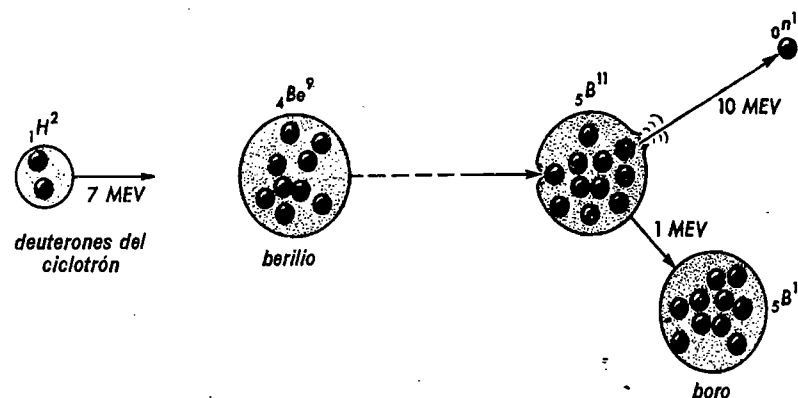


Fig. 38B. Desintegración de un núcleo de berilio por un deuterón para producir neutrones muy veloces.

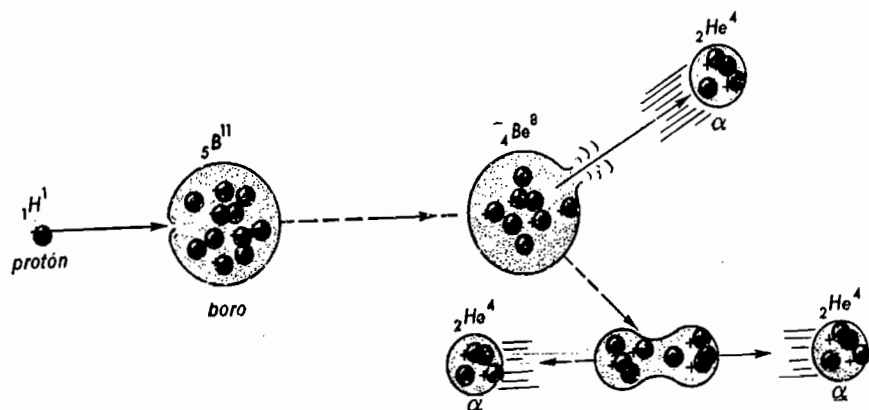
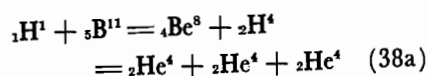


Fig. 38C. Desintegración de un núcleo de boro de masa 11 por un protón, produciendo 3 partículas α .

38.2 Desintegraciones múltiples. El estudio de ciertos experimentos de desintegración, hace ver que a veces se rompen en más de dos núcleos estables los núcleos inestables creados al capturar un protón o un deuterón por un núcleo estable. Se presentan ejemplos de esto cuando se bombardea el boro con protones y cuando se bombardea el nitrógeno con deuterones. En el caso del boro (ver la fig. 38C), primero es capturado el protón por un núcleo ${}^{11}\text{B}$ para formar un núcleo inestable de carbono ${}^{12}\text{C}$. Esta estructura compuesta se desintegra por la expulsión de una partícula α de varios millones de voltios de energía, dejando un núcleo de berilio, ${}^8\text{Be}$.



Esta combinación nuclear todavía es inestable y se divide en otras dos partículas α . Cuando se observó por primera vez este fenómeno, se pensó que las tres partículas se desprendían simultáneamente; pero la observación posterior demostró que primero era emitida una y después las otras dos. Se ha medido la energía total liberada, encontrándose que es cerca de 11 Mev y coincide casi exactamente con el valor obtenido por la pérdida de masa.

38.3 Descubrimiento de la radiactividad inducida. El descubrimiento de la radiactividad inducida fue hecho en 1934 por F. Joliot y I. Curie de Joliot.*

Por largos años los Curie-Joliot, como se les llama, estuvieron exponiendo varias sustancias a los rayos α de elementos radiactivos naturales y han estudiado las desintegraciones que se producen. En el caso particular indicado, bombardearon aluminio con partículas α del polonio y midieron la energía de los neutrones emitidos por el rechazo de los protones comprendidos de la parafina. (Ver la figura 38D) Observaron que aun después de que se retiraba la fuente de polonio, el detector seguía respondiendo a alguna clase de radiación penetrante. Al investigar la naturaleza de esta radiación, encontraron que del aluminio aun salían electrones con carga positiva.

Repitiendo el experimento para confirmar los resultados, llegaron a la conclusión de que el mismo aluminio se vuelve

* Irene Curie, hija de la mujer más famosa en el campo de la física, es esposa de Frederic Joliot. Debido a que el nombre Curie era ya famoso, los físicos de todo el mundo les llamaban, señora Curie de Joliot y señor F. Joliot, o más brevemente, los Curie-Joliot. No es extraño que la radiactividad inducida fuera descubierta por estos investigadores, ya que durante años trabajaron con sustancias radiactivas en el famoso Laboratorio de Marie Curie en el Instituto del Radio de París.

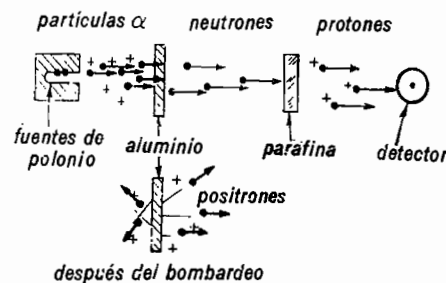
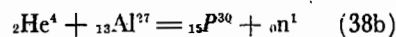
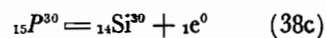


Fig. 38D. Dispositivo experimental usado por los Curie-Joliot cuando descubrieron la radiactividad inducida.

radiactivo al ser bombardeado por partículas α . Posteriormente esto se ha comprobado; las partículas α que chocan en los núcleos de aluminio, son atrapadas y el núcleo que resulta se desintegra con una violenta emisión de neutrones.



Las partículas de rechazo recién creadas, con una carga +15 y una masa 30, han sido identificadas como núcleos de fósforo no estables, sino radiactivos. Estos núcleos de fósforo radiactivo ${}^{30}\text{P}$ se desintegran espontáneamente, disparando positrones y dejando átomos estables de silicio de carga +14 y masa 30.



La *media vida* de esta actividad, que mide la rapidez de la desintegración del fósforo en silicio (para el significado de la media vida ver la Sección 34.8), es de sólo 2.5 min.

Aunque la masa del electrón no es cero, es tan pequeña comparada con las unidades de masa (se recordará que la masa de un electrón es $1/1840$ de unidad atómica de masa) que e se escribe con un índice superior cero. Conforme a esta anotación se escribe un positrón como ${}^0_{+1}\text{e}$ y un electrón como ${}^0_{-1}\text{e}$.

Debido a que no se desintegra todo el fósforo inmediatamente, se ha podido comprobar que la actividad procede de los átomos de fósforo recién creados. Una pieza de aluminio metálico, inmediata-

mente después de bombardeada, se disuelve en ácido clorhídrico junto con algo de fósforo inactivo ordinario y se hace una separación química ordinaria. Probando separadamente cada parte, se encuentra que la radiactividad está presente en el residuo de fósforo y no en el aluminio.

38.4 El descubrimiento del sodio radiactivo. Inmediatamente después que los Curie-Joliot descubrieron la radiactividad inducida, Lawrence bombardeó el sodio con deuterones de 2 Mev producidos por el ciclotrón, y encontró que aquél también, igual que el aluminio, se volvía radiactivo. (Ver la fig. 38E.) Al probar la naturaleza

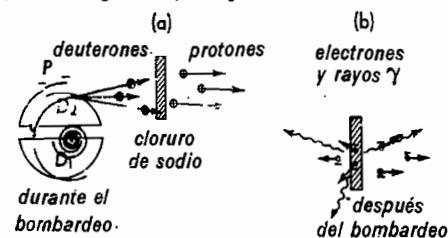
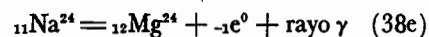


Fig. 38E. Montaje experimental usado por Lawrence al descubrir el sodio radiactivo.

de los rayos producidos durante el bombardeo, encontró Lawrence protones con una energía de unos 7 Mev. Cuando se quitó el blanco de sodio del camino del haz de deuterones, como se ve en el diagrama (b), y se probó su actividad, se encontró que emitía electrones y rayos γ . La reacción producida por el bombardeo es, por tanto,



seguido por la desintegración radiactiva del núcleo inestable del sodio,



A la izquierda de la fig. 38F se ve el primer estado del proceso, y a la derecha está la desintegración radiactiva.

El núcleo residual ${}^{24}_{11}\text{Na}$ de la primera desintegración, se llama *radio-sodio*. Teniendo una carga +11 y una masa 24,

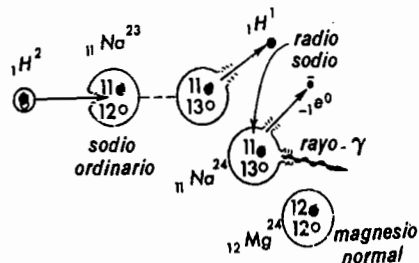
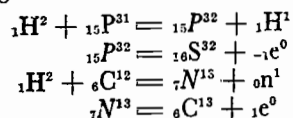


Fig. 38F. Producción y desintegración del sodio radiactivo.

debe ser un isótopo del sodio que no se encuentra en la naturaleza. Resulta claro el motivo de esto al considerar que la medida de la actividad del radio-sodio da una *media vida* de 15 horas solamente. Si alguna vez se formó en el pasado, hace mucho tiempo que se desintegró.

Hasta la fecha, se han obtenido en el laboratorio más de doscientos átomos radiactivos diferentes. Además de los dos mencionados antes, daremos otros dos por las siguientes reacciones:



La primera de estas reacciones forma el *fósforo radiactivo* $15P^{32}$ que es *activo emisor de electrones* con media vida de 15 días.

En la fig. 38G se reproduce una fotografía en una cámara de niebla de los

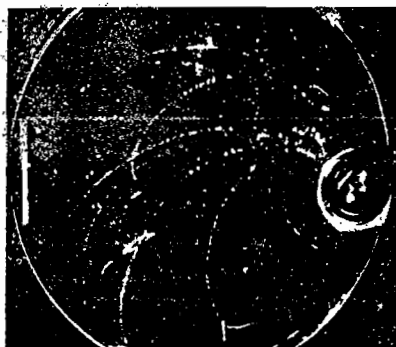
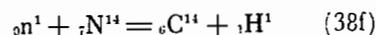


Fig. 38G. Fotografía de cámara de niebla de Wilson del rastro de los positrones emitidos por el radio-nitrógeno, $7N^{13}$.

positrones emitidos por el nitrógeno radiactivo $7N^{13}$. El campo magnético desvía todos los rayos en la misma dirección, indicando que todos tienen carga positiva. La poca densidad de las gotas de niebla que forman el rastro, indican que las partículas tienen la masa de un electrón.

38.5 Los neutrones usados como proyectiles producen desintegraciones. La primera desintegración producida usando neutrones a gran velocidad como proyectiles, fue anunciada en 1932 por el físico inglés, Feather. Siguiendo inmediatamente el descubrimiento de Chadwick de estas partículas neutras, Feather dejó que los neutrones del berilio entraran a una cámara de niebla de Wilson que contenía nitrógeno puro. Obtuvo muchas fotografías de los rastros de iones que dejaron los átomos de nitrógeno impulsados, haciendo numerosas expansiones de la cámara con disparos simultáneos de la máquina fotográfica.

La mayoría de las fotografías indicaron choques elásticos entre los átomos de nitrógeno y los neutrones; pero algunas fotografías ocasionales presentaban un rastro bifurcado, que señalaba la desintegración de un núcleo de nitrógeno.



En la fig. 38H se reproducen dos fotografías de estas desintegraciones. Aunque entran cientos de neutrones a la cámara de niebla cada segundo, éstos no ionizan átomos como lo hacen las partículas cargadas, y por ello no dejan huellas. Cuando ocurre un choque nuclear de frente, el núcleo desintegrado, que posee gran velocidad y carga positiva, deja un rastro de iones detrás de él. La bifurcación en (a) representa la huella de un protón, de longitud considerable, originado en el mismo punto en que empieza el rastro corto, pero más denso del núcleo de carbono rechazado.

Las fuentes intensas de neutrones se producen colocando una lámina delgada de berilio metálico en el potente haz de

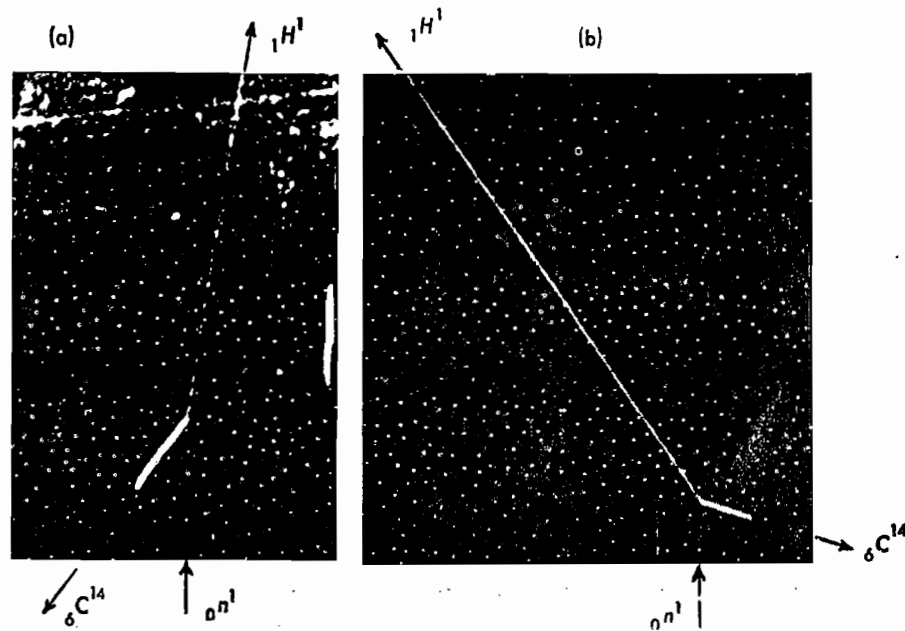


Fig. 38H. Fotografías de huellas de niebla de las desintegraciones de nitrógeno por neutrones. (Según Feather y Rasetti.)

deuterones que viene de un ciclotrón, como se ve en la fig. 38I.

En la trayectoria de este haz de partículas sin carga, se han colocado numero-

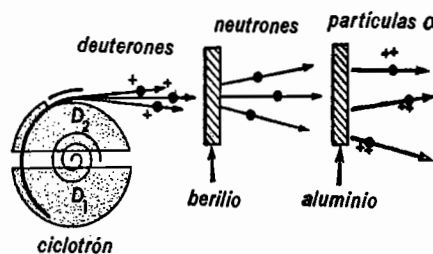
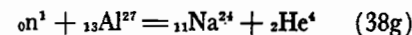


Fig. 38I. Dispositivo experimental para producir haces intensos de neutrones por el bombardeo de berilio con deuterones. Los neutrones se usan después como proyectiles en otras desintegraciones, como la del aluminio que se ilustra aquí.

sas sustancias de composición química conocida y los productos de desintegración se han estudiado con detectores apropiados. Supongamos como ejemplo, que se inserta una lámina de aluminio en el haz de neutrones, como se ve en el esque-

ma. En este caso particular se observa que del aluminio salen partículas α , permitiéndonos escribir la siguiente reacción,



Aquí se produce, por una reacción diferente, el *sodio radiactivo* que originalmente se obtuvo por el bombardeo del sodio ordinario con deuterones. Como prueba de este resultado, el blanco de aluminio bombardeado se vuelve emisor activo de rayos β y rayos γ con un período medio de 15 horas (véase la ecuación 38d). Hay por lo menos otros dos procesos de desintegración conocidos por los cuales se produce sodio radiactivo; uno, el bombardeo del silicio con neutrones, y el otro, el bombardeo del magnesio con partículas α .

Esto es sólo un ejemplo de los muchos elementos radiactivos conocidos que pueden obtenerse en cuatro formas distintas. Realmente, si se tienen proyectiles atómicos suficientemente potentes, es posible producir cientos de nuevos núcleos atómicos que no se encuentran en la naturaleza.

38.6 Desintegraciones con neutrones lentos. El hecho de que los neutrones cuyas velocidades se han reducido mucho sean capaces de desintegrar ciertos átomos, fue descubierto e investigado por el físico italiano Enrico Fermi y sus colaboradores. Un neutrón que se acerca al núcleo de un átomo no sufre fuerza de repulsión, como le sucede al protón, al deuterón o a la partícula α , y, en consecuencia, sus probabilidades de penetrar y ser capturado por el núcleo son relativamente grandes. Por esta razón, los neutrones con movimiento lento son capaces de producir desintegraciones que no pueden originar las partículas cargadas que se mueven a poca velocidad.

El método usual de producir *neutrones lentos*, consiste en rodear una fuente de neutrones rápidos con parafina o un material que contenga grandes cantidades de hidrógeno o de deuterio. Al pasar los neutrones a través de este material *moderador*, son detenidos continuamente por los choques elásticos con núcleos de hidrógeno, hasta que, a una distancia de varios centímetros de la fuente, han perdido casi toda su energía original. La poca energía que conservan es recogida por los choques térmicos regulares con otros átomos. Sus movimientos resultantes vienen a ser casi iguales a los desplazamientos irregulares de los átomos y moléculas de un gas.

Fermi recibió el Premio Nobel de Física, en 1938, por su descubrimiento experimental de la desintegración inducida por *neutrones lentos*.

38.7 El contador de centelleos. Es un aparato muy sensible, usado principalmente para detectar partículas atómicas de alta velocidad. En principio, se basa en el viejo descubrimiento de la radiactividad, de que las partículas α producen pequeños chispazos de luz cuando chocan en un material fluorescente, como el sulfuro de cinc. Estos chispazos, llamados centelleos (o cintilaciones), pueden verse adaptando la vista a la oscuridad, o pueden detectarse con un tubo fotomultiplicador.

Ahora se sabe que las partículas cargadas producen luz fluorescente en todo su trayecto cuando pasan a través de ciertos materiales transparentes. En muchos cristales y plásticos la luz fluorescente es azul o violeta.

Un tubo contador de centelleos típico, se representa en la fig. 38J. Se monta una

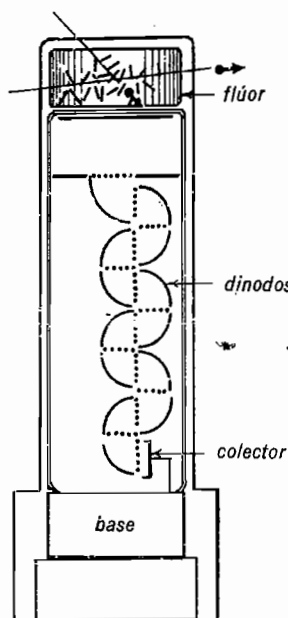


Fig. 38J. Tubo detector de centelleos usando un tubo fotomultiplicador con una placa fluorescente.

placa de material fluorescente en el extremo plano del tubo fotomultiplicador y luego se encierra en una envoltura delgada de aluminio, hermética a la luz. Cuando atraviesan el material fluorescente las partículas, la luz emite electrones del fotocátodo por efecto fotoeléctrico. La formación de electrones por los ocho o más dinodos logran un pulso de voltaje medible que activa un circuito contador eléctrico.

Cuando se intenta detectar rayos γ , se usa con frecuencia como material fluorescente, cristales de yoduro de sodio, NaI, y yoduro de cesio, CsI. Para rayos β de alta

energía se usan plásticos como el poliestireno, impregnado con antraceno. Para partículas α , con su poder de penetración relativamente bajo, se usa una capa delgada de sulfuro de cinc depositada en la cara del fotomultiplicador.

Las ventajas del contador de centelleos sobre los otros detectores de radiación nuclear son: primero, que operan en el aire o el vacío; segundo, que producen un impulso eléctrico que es toscamente proporcional a la energía perdida por las partículas que cruzan, y tercero, que pueden contar a velocidad sorprendente por tener un tiempo muerto extremadamente corto de 10^{-15} a 10^{-6} seg.

Si entra una partícula atómica a un cristal con una velocidad casi igual a la de la luz, 3×10^8 m/seg, su velocidad dentro del cristal será mayor que la propia velocidad de la luz dentro del cristal.

En la fig. 38K se ilustran las ondas de luz producidas por estas partículas a

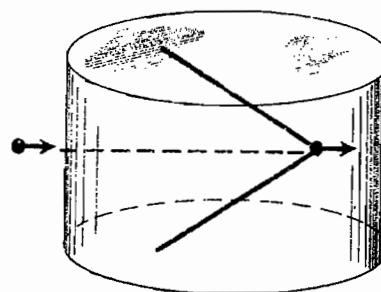


Fig. 38K. Onda cónica de una partícula atómica con alta velocidad dentro de un medio transparente; radiación Cerenkov.

alta velocidad, llamadas *radiación Cerenkov*. Esta onda de forma cónica es análoga a la onda de choque en la proa de un aeroplano que viaja a una velocidad mayor que la del sonido o a la onda en forma de V formada por la quilla de un bote que navegue más aprisa que las olas del mar.

También se montan en el extremo de los tubos fotomultiplicadores algunos materiales apropiados que emiten radiación Ceren-

kov intensa y se conectan a un aparato contador electrónico, como en la fig. 38L, y entonces forman lo que se llama un contador Cerenkov.

38.8 Aplicaciones médicas. Desde la época de su descubrimiento, el radio-sodio ha encontrado numerosas aplicaciones impor-

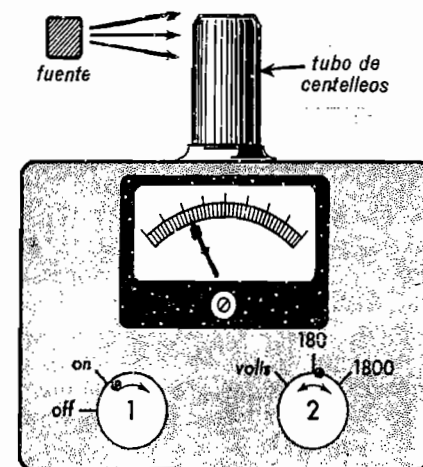


Fig. 38L. Montaje de un contador de centelleos.

tantes en muchas ramas de la ciencia. Por ejemplo, se ha usado como medio para seguir el rastro de ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas al pasar a través del cuerpo humano y de las plantas, y a lo largo de reacciones químicas experimentales. Para dar un ejemplo sencillo, se puede demostrar, bebiéndose un vaso de agua que contenga sodio radiactivo en la forma de una tableta de sal (NaCl), que el sodio ha entrado a la corriente sanguínea y se ha distribuido a todas las partes del cuerpo en un lapso de dos minutos. La presencia de la sal en la punta de los dedos de las manos o de los pies puede demostrarse detectando los electrones y los rayos γ del sodio con un contador Geiger. Se pueden efectuar experimentos semejantes con árboles y plantas para ver con qué rapidez toman sus raíces ciertas

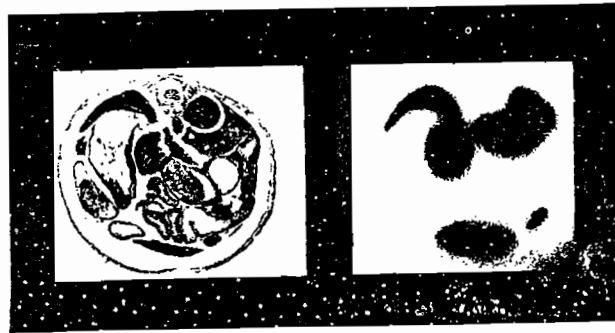


Fig. 38M. Auto-radiografía en estudios médicos. Muestra la absorción selectiva del fósforo en el hígado y el bazo.

sustancias alimenticias y las llevan hasta las hojas y las ramas.

Actualmente el radio-fósforo 32 se está usando en muchas investigaciones médicas como posible terapia para ciertas enfermedades, y también para seguir el rastro de la migración del fósforo a través del organismo. Se le prefiere por sus propiedades químicas y por su *media vida*, relativamente más larga.

Una técnica médica útil es el uso de los elementos radiactivos para obtener *radioautógrafos*. A una planta o animal se le da una sola dosis de un líquido que contenga los átomos *marcados*, y después, a intervalos diferentes de tiempo, se colocan *cortes delgados de los tejidos* de la planta o el animal en contacto directo con una placa fotográfica. La película se revela después de varias horas de exposición a los diversos rayos que provengan de los átomos *marcados* que hay en la muestra. La fig. 38M presenta a la izquierda un corte transversal, delgado, de un ratón previamente alimentado con radio-fósforo (véase la ecuación 38I), y a la derecha el radioautógrafo que resulta de este mismo corte. Las áreas oscuras indican la absorción del fósforo por las secciones del bazo y el hígado.

La fig. 38N muestra un *radioautógrafo de estroncio* y una radiografía de rayos X de una sección de pierna amputada a un paciente con sarcoma osteogénico (tumor maligno de los huesos). El paciente reci-

bió oralmente radio-estroncio dos días antes de que le amputaran la extremidad. La radiografía muestra el tumor óseo en el extremo superior de la tibia, mientras que



Fig. 38N. Radiografía con rayos X y radioautógrafo de una pierna humana. (Cortesía del doctor J. G. Hamilton.)

el radioautógrafo señala en el tumor depósitos selectivos de estroncio con pequeñas cantidades de éste en el hueso que la rodea y muy poco relativamente en los tejidos blandos. Estos estudios indican que el radio-estroncio puede ser de utilidad en la terapéutica clínica.

Referencias: 1. "Radioactivity and Nuclear Physics", por James Cork, D. Van Nostrand Co., Inc.

2. "Introduction to Atomic Physics", por Henry Semat, Farrar y Rinehart.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. ¿Qué clase de partículas de alta energía se usan comúnmente para bombardear un blanco?

2. ¿Qué clase de partículas de alta velocidad puede esperarse que sean emitidas como resultado de varios bombardeos de blancos?

3. ¿Qué es la radioactividad inducida? ¿Qué clase de partículas son comúnmente desprendidas por átomos con radiactividad inducida?

4. Las partículas cargadas dejan rastros en una cámara de niebla de Wilson. Los neutrones y los rayos γ no dejan rastros. ¿Por qué?

5. ¿Cómo son producidos los haces intensos de neutrones? ¿Pueden acelerarse los neutrones en un ciclotrón?

6. ¿Qué es una desintegración múltiple? Dar un ejemplo.

7. El oxígeno 16 bombardeado con neutrones libera protones. Escribir la reacción. (Resp. ${}_0^1n + {}_8^{16}O = {}_7^{16}N + {}_1^1H$.)

8. Calcular la energía liberada en la reacción de la ec. (38a).

9. Cuando se bombardea nitrógeno-14 con deuterones, se observa que son lanzados protones de energía considerable. Escribir la ecuación de desintegración. (Resp. ${}_1^2H + {}_7^{14}N = {}_7^{15}N + {}_1^1H$.)

10. Cuando se bombardea litio-7 con protones, se observa que son lanzadas partículas α . Escribir la reacción resultante.

11. Cuando se bombardea sodio 23 con partículas α de 9 cm de alcance, se observa que son emitidos protones. a) Escribir la reacción, y b) encontrar la energía liberada. (Resp. a) ${}_2^4He + {}_{11}^{23}Na = {}_{12}^{26}Mg + {}_1^1H$; b) +11.0 Mev.)

12. Si choca un deuterón de 5 Mev con un núcleo de carbono 12 y se libera un protón. a) ¿Cuál es la reacción?; b) ¿Cuál es el núcleo pesado residual? Suponiendo que el 92% de la energía se va con el protón,

¿cuál será, c), su energía máxima y, d), su alcance en el aire? Ver la fig. 35H.

13. Cuando se bombardea magnesio-24 con neutrones, se encuentra que salen protones del blanco. Escribir la reacción resultante. (Resp. ${}_0^1n + {}_{12}^{24}Mg = {}_{11}^{24}Na + {}_1^1H$.)

14. Cuando chocan neutrones y núcleos de nitrógeno-14, se observa que se producen partículas α . Escribir la reacción.

15. Cuando se bombardea al boro-10 con deuterones de 9 Mev, se observa que los fragmentos de la desintegración son protones, neutrones y partículas α . Suponiendo que esto indica tres transmutaciones posibles del boro-10, escribir las tres diferentes reacciones y calcular la energía liberada en cada caso.

(Resp.

$${}_1^2H + {}_5^{10}B = {}_3^{11}B + {}_1^1H + 18.3 \text{ Mev}$$

$${}_1^2H + {}_5^{10}B = {}_6^{11}C + {}_0^1n + 15.4 \text{ Mev}$$

$${}_1^2H + {}_5^{10}B = {}_2^4He + {}_2^4He + {}_2^4He + 26.97 \text{ Mev.})$$

16. Si choca un deuterón de 8 Mev con un núcleo de oxígeno 16 para producir partículas α , a) ¿cuánta energía se libera? Si la energía disponible se divide entre las dos partículas resultantes en proporción inversa a su masa, ¿cuál es, b), la energía máxima de las partículas α , y, c), su alcance en el aire?

17. Si se produce azufre-35 radiactivo por el bombardeo de cloro-35 con neutrones, ¿cuál es la ecuación de la reacción?

18. Se sabe que el bombardeo de magnesio 24 con deuterones produce sodio radiactivo. El radio-sodio es un emisor de positrones y tiene una media vida de 3 años. Escribir las ecuaciones de la reacción.

19. Cuando se permite que dos partículas α bombardeen al americio-241, se observa que el blanco desprende neutrones. ¿Cuál es la ecuación de la reacción y el nombre de los elementos producidos?

20. El bombardeo del nitrógeno-14 con neutrones da origen a la emisión de proto-

nes. a) Escribir la reacción. El núcleo residual es radiactivo y emite electrones con una media vida de 5 360 años; b) Escribir la reacción.

21. El azufre 32 bombardeado con neutrones emite protones. El núcleo residual es radiactivo y emite electrones con una media vida de 14.3 días. Escribir las ecuaciones de la reacción.

22. Al chocar los neutrones lentos con núcleos de cobalto-59 producen un isótopo radiactivo de cobalto y rayos γ . El radio-cobalto desprende electrones con una media

vida de 5.3 años. Escribir las ecuaciones de las dos reacciones.

23. El fósforo estable ha sido bombardeado con deuterones de 6 Mev para producir el isótopo más abundante del azufre. a) Escribir la reacción; b) ¿cuánta energía es liberada? Si se divide la energía disponible entre las dos partículas resultantes en proporción inversa a sus masas respectivas, ¿cuál es, c), la energía máxima de la más ligera de las dos partículas? (Resp. a) ${}_1\text{H}^2 + {}_{15}\text{P}^{31} = {}_{16}\text{S}^{32} + {}_0\text{n}^1$; b) 13.2 Mev; c) 12.8 Mev.)

39

EL NUCLEO DEL ATOMO
Y LA FISION

39.1 ¿Qué mantiene unido al núcleo?
Aunque la desintegración de diferentes núcleos produce distintas clases de partículas con diferentes cantidades de energía, parece que sólo es necesario suponer dos clases de partículas dentro del núcleo: neutrones y protones. Si esto es correcto, nuestra tarea es difícil, no sólo para explicar el mecanismo de desintegración de los núcleos inestables, sino también las fuerzas de enlace que mantienen unido al núcleo estable. Tomaremos como punto de partida para los siguientes razonamientos una posible respuesta a la última pregunta. De acuerdo con la teoría neutrón-protón del núcleo atómico (véase la figura 39A), el núcleo deuterón contiene sólo

Masa del neutrón,	$m_n = 1.00898$
Masa del protón,	$m_p = 1.00814$
Suma	$= 2.01712$
Masa del deuterón,	$m_d = 2.01474$

La diferencia de masa de 0.00238 unidades atómicas de masa (uam) no se debe a medidas inexactas, sino que es una diferencia real que debe considerarse como la energía de aniquilación que liga entre sí a las dos partículas. Cuando se unen un neutrón y un protón para formar el deuterón, se irradia una pequeña parte de la masa, precisamente 0.00238 uam (equivalente a 2.2 Mev de energía) del núcleo recién formado. En otras palabras, al acercarse las dos partículas se atraen entre sí tan fuertemente que, una vez que están juntas, se necesita el equivalente de un poco más de dos millones de voltios de energía para separarlas. Esto se ha confirmado por el efecto fotoeléctrico nuclear, un experimento en el cual se encuentra que los rayos γ de 2.2 Mev de energía o más, rompen los núcleos de deuterio en sus partes componentes, mientras que los rayos γ , de menor energía, no tienen ese efecto. ¿Cómo es que se atraen los neutrones y los protones cuando se encuentran muy próximos?, ésta es una pregunta de gran importancia, pues ahora comprendemos que la estabilidad de todo el universo conocido depende de estas fuerzas.

Considérense, como segundo ejemplo, las fuerzas de atracción entre los cuatro nucleones del núcleo de helio, es decir, los

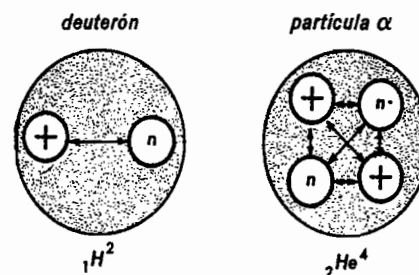


Fig. 39A. Núcleo de: (a) un átomo de deuterio y (b) un átomo de helio.

un neutrón y un protón. Comparemos, por tanto, la masa de un protón y de un neutrón libres con sus masas cuando están combinados en un deuterón (para las masas nucleares, véase el Apéndice IV).

dos neutrones y dos protones de una partícula α , como se ve en la figura 39A. Combinando las masas de las cuatro partículas libres y comparándolas con la masa del átomo de helio, obtenemos,

$$2\text{H}^1 + 2\text{H}^1 = 4.03424 \text{ uam}$$

$${}^4\text{He}^4 = 4.00387 \text{ uam}$$

$$\text{Diferencia de masa} = 0.03037 \text{ uam}$$

Multiplicando la diferencia de masa por 931, obtenemos,

$$E = 28 \text{ Mev}$$

Este valor de 28 Mev indica una energía de unión de 7 Mev por nucleón, un valor considerablemente mayor que 2.2 Mev que hay en el deuterón. Esto es también la cantidad de energía que debemos gastar para romper las seis ligas de atracción señaladas en el diagrama.

Si hacemos cálculos semejantes para los núclidos de la primera parte de la tabla periódica y los representamos en una gráfica de energía de unión por nucleón, E/A , donde A es el número de masa, obtenemos la fig. 39B. Si se sigue adelante con el mismo procedimiento con toda la tabla periódica, se obtiene una gráfica como la fig. 39C. Trazando una recta horizontal en la parte superior de la gráfica a los 8 Mev, como se puso en rojo en la figura, obtenemos una especie de energía

promedio de unión por nucleón para casi todos los elementos. Este valor es aproximadamente la diferencia entre la unidad de masa atómica y la masa de un neutrón o protón libre.

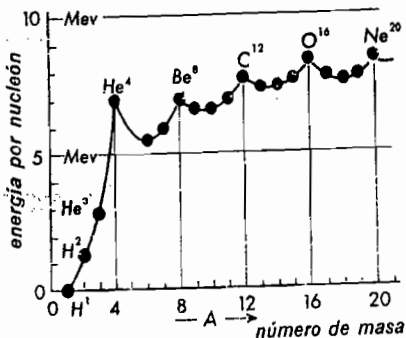


Fig. 39B. Energía de unión por nucleón en los elementos más ligeros de la tabla periódica.

En la fig. 39D se muestra un proceso llamado efecto fotoeléctrico nuclear y que no se ha descrito hasta aquí. Se absorbe un fotón de energía $h\nu$ al pasar cerca de un núcleo; parte de su energía se usa en sacar un neutrón o protón del núcleo y el resto se le da a esa partícula como energía cinética.

$$h\nu = W + \frac{1}{2}mv^2 \quad (39a)$$

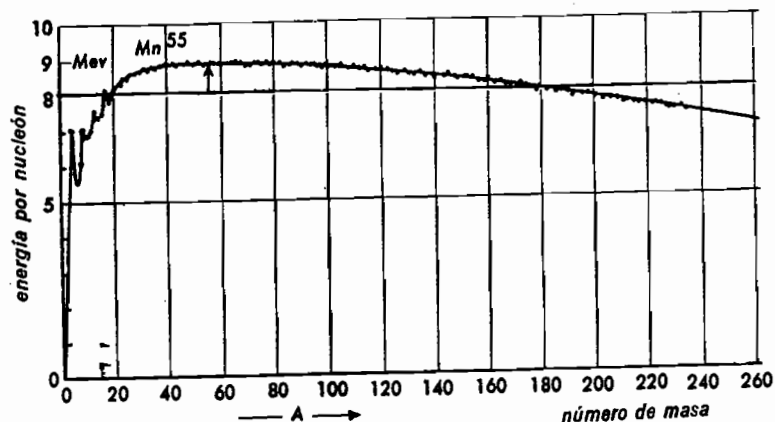


Fig. 39C. Energía de unión por nucleón para los isótopos estables de la tabla periódica.

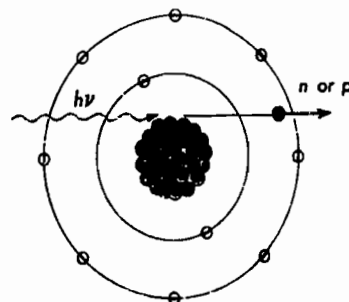


Fig. 39D. Diagrama ilustrando el efecto fotoeléctrico nuclear.

La función trabajo W , como vimos antes, es de cerca de 8 Mev y esencialmente es la energía necesaria para crear la masa extra necesaria para que salga libre el nucleón.

39.2 La fracción de empaqueo. Un método informativo de presentar las diferencias de masa y las energías de unión de los núcleos estables, es por medio de una gráfica de todas las fracciones de empaqueo. La fracción de empaqueo de cualquier núclido se obtiene por la relación

$$P = \frac{M - A}{A} \quad (39b)$$

donde $M - A$ de cualquier núclido es llamado su defecto de masa.

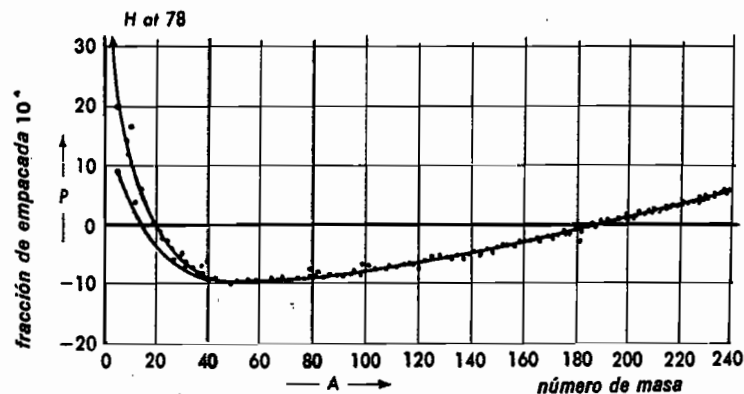


Fig. 39E. Gráfica de la fracción de empaqueo para núcleos estables.

$$M = \text{masa del núclido} \quad (39c)$$

$$A = \text{número de masa}$$

En otras palabras, P es la diferencia entre la masa promedio del nucleón para ese núclido y la unidad atómica de masa. Se ve en la fig. 39E que los núclidos muy ligeros y los muy pesados tienen una masa promedio mayor que la unidad, mientras que los del centro de la tabla tienen una masa menor que la unidad. En el siguiente capítulo veremos que estas diferencias están relacionadas directamente con la disponibilidad de energía nuclear.

39.3 La barrera de potencial nuclear. Cuando se empezaron a desarrollar las ideas referentes a la desintegración nuclear, Gamow propuso un modelo con el cual podría representarse el núcleo atómico. Este modelo se basa en las fuerzas que actúan entre dos cargas positivas.

Imaginemos un protón o una partícula α , con su carga positiva, acercándose a un núcleo cargado también positivamente. Conforme más se acercan las dos cargas, se repelen entre sí con fuerzas cada vez mayores, según la ley de Coulomb, ecuación (26a).

$$F = k \frac{QQ'}{r^2} \quad (39d)$$

Esta repulsión no puede continuar aumentando hasta una separación cero, pues sabemos, por lo que se ha dicho en la sección anterior, que debe haber una atracción. Gamow propuso que al acercarse mucho se tenga otra ley de fuerzas que entre en funciones, y que esta fuerza sea de atracción para los neutrones al igual que para los protones y sea muy fuerte.

Sabiéndose que la ley de Coulomb es bastante exacta a distancias grandes, se llama a este factor adicional fuerza de corto alcance. Las gráficas de la ley de Coulomb para repulsión y la fuerza de corto alcance para atracción se muestran en la fig. 39F. Nótese que cuando la par-

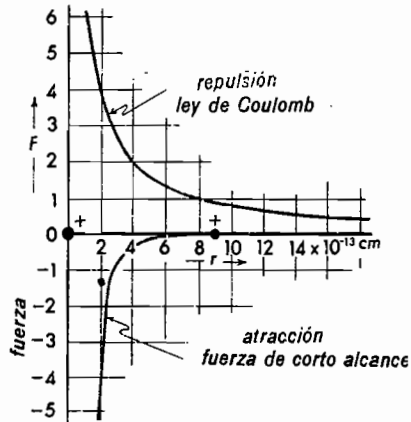


Fig. 39F. Diagrama de las dos leyes de fuerzas para una carga positiva cercana a un núcleo.

tícula está a la distancia indicada, 9×10^{-13} cm, es predominante la ley de Coulomb de repulsión, mientras que a una distancia menor de 2×10^{-13} cm, predomina la fuerza de atracción de corto alcance. Ya que ambas fuerzas son efectivas a todas distancias, deben combinarse en una gráfica como se ven en la curva F de la fig. 39G. Si en lugar de la fuerza F hacemos la gráfica de la energía potencial almacenada entre las dos partículas, obtenemos la curva de E.P. presentada en línea de puntos. Esta curva representa lo que se llama la barrera de

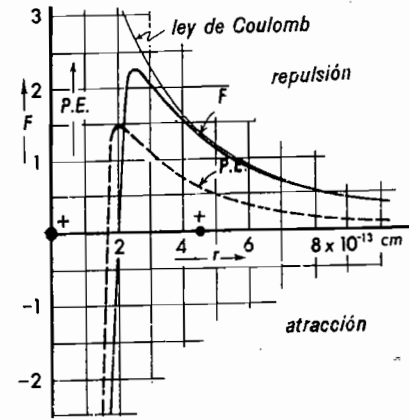


Fig. 39G. Gráfica de la fuerza y la energía potencial de una partícula cargada positivamente cerca de un núcleo.

potencial del núcleo. El punto más alto de la barrera es llamado frecuentemente la orilla del núcleo que, para átomos de la tabla periódica, ocurre y da un radio nuclear de 1 a 6×10^{-13} cm.

Si buscamos un modelo mecánico del núcleo, podemos imaginar una superficie que tenga la forma del cráter de un volcán, semejante a la que se obtiene haciendo girar el diagrama (b) alrededor del eje vertical (véase la fig. 39H). En este caso, la energía potencial eléctrica E.P. entre las dos partículas cargadas positivamente, es análoga a la energía po-

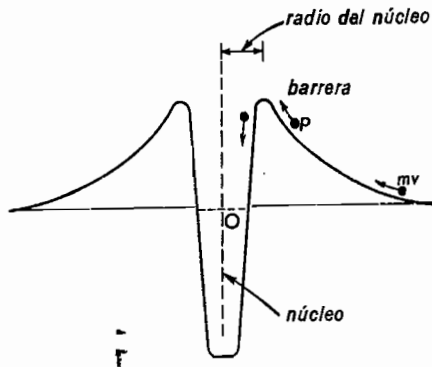


Fig. 39H. Modelo gráfico del núcleo atómico propuesto por Gamow. La barrera de potencial que opone un núcleo a una partícula positiva que se acerca a él es análoga al cráter de un volcán.

tencial de una bola en cualquier punto del modelo del cráter, y la fuerza electrostática de repulsión es análoga a la fuerza de gravedad.

Si ahora se acerca a la barrera nuclear una pequeña esferilla que represente a un protón o una partícula α , rodará hacia la cima de la loma, como se ve en el diagrama. Al experimentar una fuerza hacia abajo, debida a la pendiente, que crece con rapidez, la bola puede regresar o desviarse hacia un lado. Pero si la velocidad inicial es suficientemente grande, la esferilla puede saltar por encima del borde de la barrera y caer adentro, representando una captura. Lo que ocurre dentro del núcleo, y la desintegración que tiene lugar en seguida, es el tema de la siguiente sección de este capítulo.

39.4 Modelo Nuclear de Bohr. En 1937 Niels Bohr, el famoso físico danés, hizo otra importante contribución a la física moderna cuando perfeccionó el modelo del núcleo de Gamow, aplicándolo al que es llamado a veces el modelo de gota de agua del núcleo. Bohr imagina las partículas dentro de un núcleo pesado, moviéndose dentro de una envoltura esférica con movimientos análogos a los de las moléculas que hay en una gota de agua. Ver figura 39I. La superficie de la envoltura esférica, que es el borde de la barrera de po-

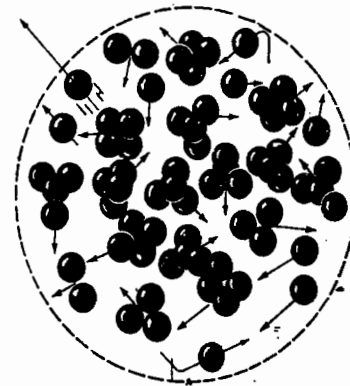


Fig. 39I. Núcleo en el momento de lanzar un neutrón, basado en el modelo de gota de Bohr-Gamow.

tencial que se representa en la fig. 39H, es análoga en sus funciones a la tensión superficial que mantiene a una pequeña gota de agua en su forma esférica.

Así como el movimiento rápido de las moléculas de agua se mide por la temperatura, Bohr habla del movimiento rápido de los neutrones y los protones dentro de la envoltura esférica del núcleo, como una especie de pseudotemperatura. Para explicar la desintegración, se hace la analogía de que el lanzamiento de una partícula del núcleo es como la evaporación de una molécula de agua en una gota de la misma. Lo mismo que una elevación de temperatura produce una evaporación más rápida del agua, el aumento de los movimientos dentro del núcleo da lugar a una mayor probabilidad de desintegración.

En un núcleo estable, las partículas internas se están moviendo con muy poca energía cinética, y están en un estado análogo al de una temperatura relativamente baja. Cuando penetra a través de la barrera de potencial una partícula exterior de velocidad elevada, es acelerada hacia el centro del núcleo y adquiere una energía cinética muy grande antes de chocar con

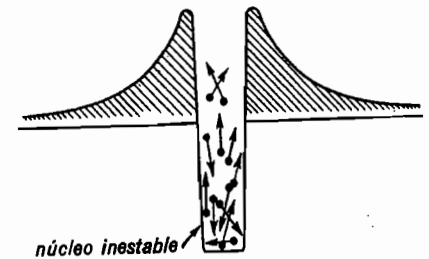


Fig. 39J. Diagrama que representa un núcleo inestable.

una o más de las partículas interiores. Pronto se reparte la energía entre las partículas, y el núcleo se encuentra en un estado de temperatura más alta. La figura 39J presenta un modelo de pozo de potencial para esta misma situación.

Al moverse ahora las partículas interiores hay una cierta probabilidad, u oportunidad, de que en un intervalo de tiempo

dado, alguna partícula sea golpeada por otras partículas, dándole una velocidad suficientemente elevada y hacia afuera, que le permita escapar a través de la barrera de potencial. A más rápidos movimientos internos, es decir, a temperatura más alta, mayor es la probabilidad de que haya fugas.

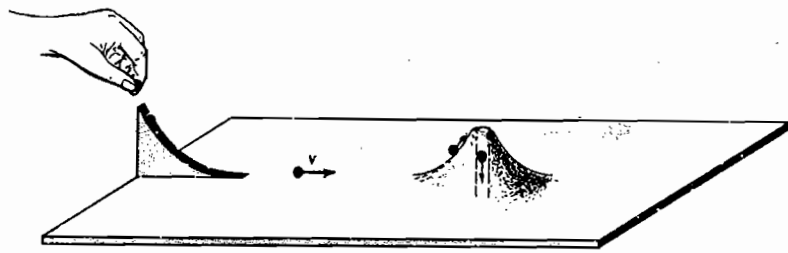


Fig. 39K. Modelo mecánico de un núcleo para demostrar la captura de un protón, deuterón o partícula de gran velocidad, antes de la desintegración.

Una desintegración directa puede describirse en esta forma: si al entrar en el núcleo un protón u otra partícula semejante a gran velocidad, agrega suficiente energía para que el núcleo suba a temperaturas altas, puede emitirse inmediatamente otra partícula, como un neutrón o partícula α . Ya que esta partícula emitida debe proveerse con una cierta cantidad mínima de energía para que salga libre, las partículas restantes se moverán más lentamente, y el núcleo tendrá una temperatura más baja.

39.5 Modelos nucleares de demostración. Se ve en la figura 39K un modelo de demostración para ilustrar la captura de un protón o una partícula de gran velocidad en un núcleo, antes de una desintegración. Las esferillas que ruedan bajando por el plano inclinado, representan los proyectiles atómicos, siendo acelerados por un acelerador, como el ciclotrón. Al acercarse a la barrera de potencial, la esferilla puede rodar hacia arriba parcialmente, y luego desviarse hacia un lado, ilustrando un choque elástico sin captura; o puede rodar hasta la cumbre y caer dentro de la

abertura del cráter, representando una captura precursora de una desintegración.

En la fig. 39L se ve una demostración de lo que ocurre dentro del núcleo, ilustrado con otro modelo. En este caso se ha reducido necesariamente la escala vertical de la barrera, es decir, se ha aplanado. Cuando rueda una esferilla bajando por

el plano inclinado, y cayendo luego en el grupo de bolitas que están dentro de la barrera, puede haber varios choques antes de que otra partícula sea expulsada hacia afuera por el lado opuesto. Esto corresponde a una desintegración directa, en donde entra una partícula, por ejemplo, un protón, y sale un neutrón.

Si no sale ninguna partícula, la mayoría de las bolas interiores toman movimientos



Fig. 39L. Modelo mecánico del núcleo para demostrar: (a) el aumento de energía cinética de las partículas después de una captura y (b) las probabilidades de una desintegración radiactiva por la expulsión de una partícula.

desordenados, chocando entre sí en forma muy parecida a como lo hacen las moléculas o átomos de un gas. Para evitar que el rozamiento las detenga (ya que no hay fricción dentro de un átomo), las esferillas son agitadas continuamente por una pe-

queña punta que sale a través del fondo. Este perno se monta ligeramente descendido sobre el eje de un pequeño motor eléctrico. Si se deja activo el motor por algún tiempo, llegará el momento en que una bolita golpeada por varias partículas que se muevan en la misma dirección y adquirirá la suficiente velocidad para saltar por encima de la barrera y para salir afuera. Esto corresponde a una desintegración radiactiva, que tiene lugar de acuerdo con las leyes del azar, y produce un descenso de la temperatura del núcleo.

Cuanto más de prisa gire el motor, mayor es la agitación interna, mayor es la probabilidad del lanzamiento, y más corto será el llamado período de media vida del elemento.

39.6 Modelo nuclear de desintegraciones por neutrones. Cuando se acerca un neutrón a un núcleo antes de que ocurra una desintegración, no encuentra una ba-

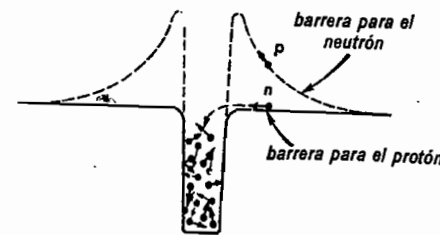


Fig. 39M. Modelo del núcleo, según se enfrenta a un neutrón y a un protón que se acercan a él.

rrera de potencial del tipo antes descrito para los protones y las partículas α . El neutrón no tiene carga, así que no es rechazado por el núcleo cargado. Por tanto, puede

acercarse al núcleo con baja velocidad propia, y aun así ser capturado cuando se acerca demasiado. Cuando está muy cerca se produce la gran fuerza de atracción de la fig. 39F, que los acerca uno al otro.

El núcleo viene a ser una especie de pozo en el cual cae el neutrón que se va acercando. En la fig. 39M se indica esto por la línea de potencial plana. La esferita que rueda por la superficie horizontal hacia el pozo, representa la influencia del núcleo sobre el movimiento del neutrón, mientras que la bolita que rueda subiendo la loma (línea punteada), representa la influencia del mismo núcleo sobre el movimiento de un protón. Un modelo mecánico basado en la fig. 39J, y con la forma de una barrera para neutrón, da una excelente demostración para la dispersión y captura de neutrones.

39.7 Rotación nuclear. Se sabe que la tercera parte, aproximadamente, de todos los núclidos estables conocidos y muchos de los radiactivos están girando, o sea que tienen un momento angular. La primera evidencia de una rotación nuclear, como se le llama, se encontró en los espectros atómicos. Muchas líneas del espectro presentan una estructura fina, es decir, están formadas por un grupo de líneas muy cercanas, llamadas estructura superfina.

Como ejemplo de esta estructura superfina se ven en la fig. 39N las líneas del espectro del elemento praseodimio. En un espectrograma normal se ven como líneas simples; pero con la gran dispersión y amplificación usadas aquí, cada línea revela seis componentes superfinos. Los seis componentes significan que el núcleo de pra-



Fig. 39N. Fotografías de la estructura superfina de algunas líneas del espectro del elemento praseodimio, $z = 59$. Las longitudes de onda están en unidades Angstrom. La estructura es producida por la rotación nuclear.

seodimio tiene una cantidad de movimiento angular p_1 de $\frac{5}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$.

La cantidad de movimiento angular de los núcleos se obtiene en general con

$$p_1 = I \frac{h}{2\pi} \quad (39e)$$

donde I es el número cuántico de giro y h representa la constante de Planck. Ver la ec. (32b). Los experimentos cuantitativos prueban que este número cuántico, I , puede tomar valores tanto de enteros como de medios de entero como se ven en la Tabla 39A.

TABLA 39A. ROTACIÓN NUCLEAR DE VARIOS NÚCLIDOS

Elemento	Núclido (Isótopo)	Rotación I
Hidrógeno	${}^1_1\text{H}^1$	1/2
Hidrógeno	${}^2_1\text{H}^2$	1
Litio	${}^6_3\text{Li}^6$	1
Litio	${}^7_3\text{Li}^7$	3/2
Berilio	${}^9_4\text{Be}^9$	3/2
Boro	${}^{10}_5\text{B}^{10}$	3
Oxígeno	${}^{16}_8\text{O}^{16}$	0
Oxígeno	${}^{17}_8\text{O}^{17}$	5/2
Vanadio	${}^{51}_{23}\text{V}^{51}$	7/2
Manganeso	${}^{55}_{25}\text{Mn}^{55}$	7/2
Mercurio	${}^{199}_{80}\text{Hg}^{199}$	1/2
Mercurio	${}^{200}_{80}\text{Hg}^{200}$	0
Bismuto	${}^{209}_{83}\text{Bi}^{209}$	9/2

39.8 Un nuevo descubrimiento. En 1939, Hahn, Strassman y Meitner, en Alemania, sometieron el metal uranio a un bombardeo con neutrones y observaron radiactividades con diferentes períodos de media vida. Para encontrar qué núclidos o elementos eran causantes de estas diferentes actividades, efectuaron cuidadosamente una serie de separaciones químicas de una muestra de uranio irradiado. Para su sorpresa, encontraron que los átomos radiactivos eran idénticos químicamente a un grupo de elementos cercanos al centro de la tabla periódica. En otras palabras, los

núcleos de uranio, después de atrapar un neutrón, parecían estarse dividiendo en dos fragmentos casi iguales, como lo ilustra la fig. 39O.

En las siguientes semanas después de este descubrimiento hubo muchos observadores en laboratorios de todo el mundo que, no sólo confirmaron los resultados, sino que ampliaron las observaciones estudiando detalladamente los productos de las desintegraciones. Para explicar el fenómeno en palabras sencillas, considérense los detalles del proceso ilustrado en la figura 39O. Se ve a la izquierda un núcleo de uranio ${}^{235}_{92}\text{U}$, con 92 protones y 143 neutrones al capturar un neutrón con movimiento lento.

En el diagrama (b) del centro, el núcleo inestable recién formado empieza a separarse en dos partes casi iguales. Como este proceso se parece a la división de las células en biología, se llama fisión a este fenómeno. Al romperse el núcleo de uranio se comporta como una gota de agua que salpica gotitas pequeñas, o sea neutrones y rayos γ . Es tanta la energía liberada en esta explosión del núcleo que cada uno de los dos núcleos pesados vuela en dirección opuesta. Esto se ha confirmado con muchas fotos de cámara de niebla de Wilson, como la que se reproduce en la figura 39P.

Para lograr esta foto se colocó una capa delgada de uranio cerca del centro de la cámara de niebla y se dejó irradiar. La fisión subsecuente de un núcleo de uranio revela dos rastros de igual densidad, mostrando claramente que las dos partículas pesadas viajaron hacia afuera en direcciones opuestas. Las pesadas horquillas cerca del extremo de los rastros son características de los fragmentos de fisión fuertemente cargados, que han tenido varias colisiones con otros núcleos antes de quedar en reposo.

No todos los núcleos de uranio se dividen en antimonio y niobio como en la fig. 39O, sino en cualquier otro par de fragmentos que correspondan a elementos cercanos al centro de la tabla periódica.

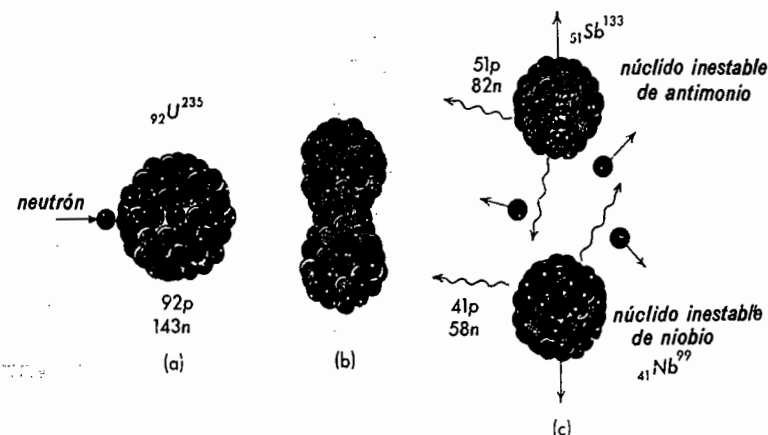


Fig. 39O. Fisión del uranio en dos núclidos inestables.



Fig. 39P. Fotografía de cámara de niebla de Wilson mostrando un par de fragmentos de fisión retrocediendo en direcciones opuestas. Nótese la horquilla de rayos delta cerca de los extremos. La fisión se produjo por un haz de neutrones producido a su vez por un ciclotrón. (Cortesía de I. K. Boggild.)

La evidencia experimental parece favorecer a los pares de masa desigual, acompañados por neutrones desde uno a cinco, y aún más, como se ve en el diagrama (c).

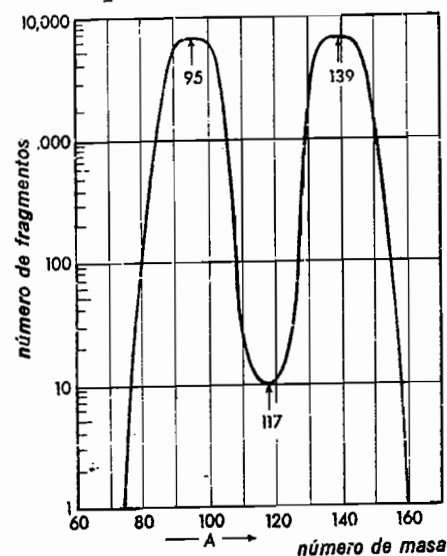


Fig. 39Q. Gráfica semilogarítmica de la producción de fragmentos de fisión por neutrones lentos chocando con uranio-235.

Las numerosas medidas de las masas de los fragmentos de fisión han hecho posible construir la gráfica de la fig. 39Q. La producción de fragmentos de fisión se representa verticalmente en una escala logarítmica y el número de masa A horizontalmente y en escala uniforme. Se ve la curva subir rápidamente entre $A=75$ y 80 y bajar con igual rapidez entre $A=155$ y 160 . Los valores más probables de

los números de masa de los dos fragmentos son 95 y 139 con un mínimo de un décimo del uno por ciento para $A=117$.

En general, los fragmentos de fisión son núcleos no estables que contienen un exceso de neutrones. Lo que ocurre a la mayoría de los fragmentos presentados en la fig. 39Q(c) se detalla en la fig. 39R. Después de una serie de emisiones β , en que los neutrones son transformados en protones dentro del núcleo, resulta un núcleo estable.

Empezando por la izquierda con el diagrama de un núclido inestable de antimonio de carga $+51$ y masa 133, la emisión sucesiva de cuatro electrones sube la carga nuclear en pasos de cuatro unidades, acabando en un núclido estable de cesio, ${}_{55}\text{Cs}^{133}$. El otro fragmento, ${}_{41}\text{Nb}^{95}$, de la fig. 39Q(c), realiza una serie similar de emisiones β , terminando como ${}_{41}\text{Ru}^{99}$.

Como prueba de que la serie anterior es producida por la fisión, se ha analizado químicamente uranio previamente bombardeado, buscando elementos del centro de la tabla periódica. Después de cada separación química, se hace una prueba de actividad de rayos β midiendo el período de media vida. Se han podido identificar algunos de los núcleos producidos por comparación de estos períodos de media vida medidos, con los valores ya conocidos del mismo elemento, a partir de otros experimentos de desintegración. Estas pruebas han sido hechas, por ejemplo, por Wu*

* C. S. Wu, *Physical Review*, vol. 58, 1940, pág. 925.

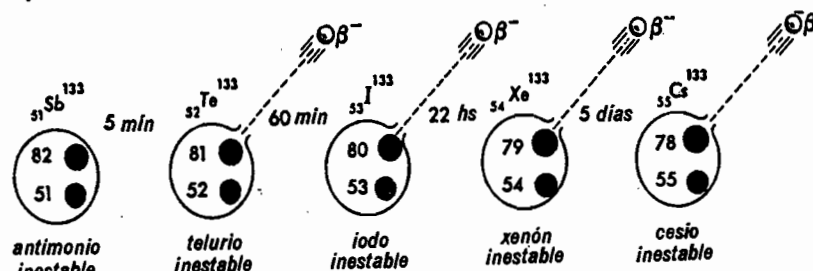


Fig. 39R. Serie de desintegración que empieza con antimonio inestable, uno de los fragmentos de la fisión de un núcleo de uranio-235.

para la serie de los cuatro elementos de la fig. 39R. Nótese las crecientes medias vidas que ella identificó para esta serie, indicando creciente estabilidad conforme se acercaba al núcleo estable de cesio.

Aproximadamente el 99% de los neutrones resultantes de la fisión del uranio aparecen dentro de una pequeña fracción de segundo, y son llamados neutrones pronto o neutrones secundarios. Cerca del uno por ciento son emitidos uno o más segundos después, y son llamados neutrones retrasados. Los neutrones retrasados se originan de los fragmentos inestables que se degradan por emisión de neutrones en su camino hacia la formación de los núcleos estables.

39.9 Energía de fisión. La energía liberada en la fisión del uranio se debe principalmente al isótopo U-235. El uranio que se encuentra en la corteza terrestre tiene tres isótopos principales con las abundancias relativas siguientes.

U-238	99.280%	4.51×10^8 años
U-235	0.714%	7.10×10^8 años
U-234	0.006%	2.48×10^5 años

Los tres núclidos son radiactivos y se degradan con emisión de partículas α . Ver el Apéndice III.

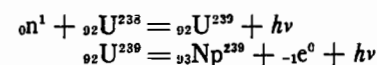
Cuando se captura un neutrón lento o rápido en un núcleo de U-235, tanto los dos fragmentos de la fisión como los neutrones, salen disparados con una cantidad tremenda de energía cinética. Esta energía liberada se puede ilustrar mejor mediante gráficas. En la fig. 39S se representa ver-

tualmente el número de los fragmentos de la fisión, y horizontalmente su energía cinética en Mev. El resultado es una curva con dos máximos a 67 Mev y 100 Mev.

Cuando se fisiona un núcleo U-235 como resultado de la captura de un neutrón lento, el número promedio de neutrones liberados resulta ser 2.5 neutrones por fisión. Algunos pueden producir hasta 5 neutrones, pero el número más probable es de 2 ó 3.

La energía en rayos γ , promedio que se emite en la fisión de U-235, es aproximadamente de 23 Mev, mientras que la energía total es aproximadamente 200 Mev.

39.10 Los elementos transuránicos. El primer elemento transuránico, el neptunio, número atómico 93, fue identificado en 1939 por Mc-Millan y Abelson. Un haz de neutrones que chocaron en un blanco de metal uranio, dieron lugar a varias reacciones nucleares conocidas. Un neutrón capturado por uno de los núcleos más abundantes de U-238 forma U-239 y un rayo γ , seguido de una emisión β , para producir neptunio, elemento 93.



Ahora se conocen diez isótopos del neptunio. El isótopo ${}_{93}^{237}\text{Np}$, entre los que van desde 231 a 240 en número de masa, emite partículas α y tiene la más larga media vida, 2.2 millones de años. Aunque la captura de neutrones lentos o rápidos por el U-238 es seguida casi siem-

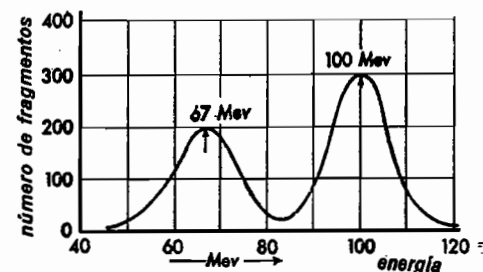
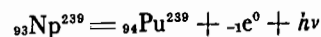


Fig. 39S. Gráfica de las energías de los fragmentos de la fisión del uranio-235.

pre por emisión β , sólo uno de cada cien neutrones produce fisión.

El plutonio (Pu), elemento 94, fue identificado por primera vez por Kennedy, McMillan, Seaborg, Segre y Wahl, resultando de la emisión espontánea de partículas β del ${}^{239}\text{Np}$.



En la fig. 39T se representan esquemáticamente los procesos anteriores. Se conocen hasta ahora quince isótopos radiactivos

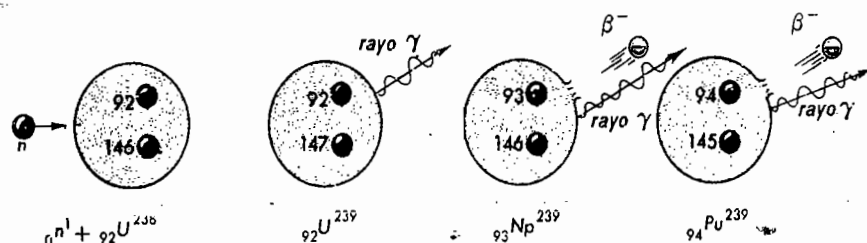


Fig. 39T. La captura de un neutrón por el uranio-238 produce, por desintegración radiactiva β , neptunio y plutonio.

del plutonio. Sus números de masa van de 232 a 246, y varios tienen medias vidas largas.

- ${}^{239}\text{Pu}$ activo α con 24 300 años
- ${}^{240}\text{Pu}$ activo α con 6 000 años
- ${}^{242}\text{Pu}$ activo α con 380 000 años
- ${}^{244}\text{Pu}$ activo α con 7.6×10^7 años

El americio (Am), elemento 95 y el curio (Cm), elemento 96, fueron descubiertos en 1944 por Seaborg, James, Morgan y Ghiorso, en colaboración con Hamilton. Una cantidad medible de ${}^{239}\text{Pu}$ fue bombardeada en ciclotrón de Berkeley con núcleos de helio de 40 Mev y se formaron dos isótopos ${}^{240}\text{Cm}$ y ${}^{242}\text{Cm}$ por las reacciones (α, n) y $(\alpha, 3n)$. Estos núcleos son emisores α con medias vidas de un mes y de cuatro meses, respectivamente. ${}^{241}\text{Am}$ fue descubierto primero, como emanando de un emisor β de vida larga, ${}^{241}\text{Pu}$, y emite partículas α con una media vida de 500 años.

Ahora se conocen diez isótopos del americio de número de masa que va de 237 a 246; el ${}^{243}\text{Am}$ tiene la mayor media vida con 8 000 años y emite partículas α . Se conocen ahora trece isótopos del curio. Tienen número de masa desde 239 hasta 250. Hay varios isótopos que tienen media vida larga. Estos son:

- ${}^{245}\text{Cm}$ activo α con 8 000 años
- ${}^{247}\text{Cm}$ activo α con 4×10^7 años
- ${}^{248}\text{Cm}$ activo α con 5×10^5 años

El berkelio (Bk), elemento 97, fue descubierto en 1949 por Thompson, Ghiorso y Seaborg. El ${}^{241}\text{Am}$ bombardeado por partículas α de 35 Mev produce ${}^{243}\text{Bk}$. La captura K con media vida de 4.7 horas convierte el 99.9% de estos núcleos en ${}^{243}\text{Cm}$, con 0.1% convertidos en ${}^{243}\text{Am}$ por emisión de partículas α . La captura K es un proceso en el que un núcleo captura un electrón de la capa más íntima, n-1, de la estructura exterior del átomo.

Se conocen ocho isótopos del berkelio actualmente. Varían de 243 a 250 de número de masa; el ${}^{247}\text{Bk}$ tiene una media vida de 1 000 años y es activo α .

El californio (Cf), elemento 98, fue descubierto en 1950 por Thompson, Street, Ghiorso y Seaborg. El ${}^{242}\text{Cm}$ bombardeado con partículas α de 35 Mev, produce ${}^{244}\text{Cf}$. Con una media vida de 45 min, el ${}^{244}\text{Cf}$ lanza partículas α con 7.1 Mev de energía para producir el ${}^{240}\text{Cm}$.

Se conocen once isótopos del Cf varían de 244 a 254 de número de masa. El

isótopo ${}^{251}\text{Cf}$ tiene la más larga media vida, 800 años y es activo α .

El einstenio (E), elemento 99, y el fermio (Fm), elemento 100, fueron descubiertos como resultado del siguiente proyecto conjunto de dieciséis científicos. En noviembre de 1952 se detonó la primera explosión termonuclear a gran escala en una isla del Océano Pacífico. La explosión produjo un cráter de 1.5 kilómetros de ancho en una isla de coral y la nube radi-

activa subió a 16 kilómetros, alcanzando un diámetro de 160 kilómetros. Aviones controlados por radio volaron a través de esta nube, recogiendo muestras para estudios de laboratorio. Entre otras cosas, se encontró que algunos de los núcleos de uranio que no sufrieron fisión habían capturado hasta 17 neutrones y formado ${}^{255}\text{U}$. Los elementos 99 y 100 se identificaron como productos radiactivos de emisión β de estos núcleos inestables.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Calcular la energía total, en Mev, necesaria para separar un núcleo helio-4 en dos núcleos de deuterio.

2. Cuánta energía en Mev se requiere para partir un núcleo helio-4 en dos protones y dos neutrones?

3. Calcular la energía total, en Mev, necesaria para separar un núcleo de litio-7 en protones y neutrones individuales.

4. Cuánta energía en Mev sería liberada si se pudieran unir en número apropiado los neutrones y protones que formarían un núcleo de argón-40?

5. Con qué otro nombre se conocen los siguientes conceptos: a) electrón; b) protón; c) deuterón; d) partícula α ; e) positrón; f) rayos X; g) rayos γ , y h) fotón?

6. Calcular la masa energía liberada al combinarse tres protones y tres neutrones para formar un núcleo de litio-6.

7. Trazar una curva de energía potencial para un protón que se acerca a un núcleo.

8. Trazar una curva de energía potencial para un neutrón que se acerca a un núcleo.

9. ¿Es válida la ley de Coulomb de la repulsión entre cargas iguales dentro del núcleo de un átomo?

10. Cuánta energía se requiere, aproximadamente, para separar un nucleón de un núcleo?

11. ¿Qué es una barrera de potencial? ¿Qué modelo mecánico equivalente es usado a veces para representar esta barrera?

12. ¿Cuál es el modelo de gota de agua del núcleo? ¿Cómo se usa para explicar la diferencia entre el núcleo estable y el núcleo radiactivo?

13. ¿Qué modelo mecánico puede usarse para ilustrar las condiciones necesarias para la captura de un protón o partícula α de alta velocidad?

14. ¿Qué modelo mecánico puede usarse para ilustrar la desintegración de un núcleo radiactivo?

15. ¿Qué se puede decir de la comparación de un núcleo radiactivo de media vida corta con otro de media vida larga?

16. Usando las masas atómicas dadas en el Apéndice IV, calcular la energía de ligado por nucleón para: a) boro-10, y b) carbono-12.

17. Usando las masas atómicas dadas en el Apéndice IV, calcular la energía de ligado por nucleón para: a) oxígeno-16, y silicio-29. (Resp. a) 7.97 Mev; b) 8.44 Mev.)

18. Calcular la fracción de empaquetado para: a) helio, y b) argón-40. Ver el Apéndice IV para las masas atómicas.

19. Calcular la fracción de empaquetado para: a) boro-10, y b) cloro-35. (Resp. a) 0.00161 uam; b) -0.00057 uam.)

20. Hacer un diagrama como el de la fig. 39O, presentando un núcleo de plutonio que capturando un neutrón lento, sufre su fisión. Suponer que se emiten tres neutrones rápidos y que los fragmentos son $^{140}_{55}\text{Cs}$ y $^{94}_{36}\text{Yt}$, respectivamente.

21. Si uno de los fragmentos de la fisión de U-235 es el isótopo radiactivo iodo-139, ¿en qué isótopo estable se convierte si son emitidas una serie de partículas β ? Hacer un diagrama como el de la fig. 39R. (Resp. $^{139}_{57}\text{La}$.)

22. Si uno de los fragmentos de la fisión del U-235 es el isótopo radiactivo estroncio-97, ¿en qué isótopo estable se convertirá

por una serie de emisiones de partículas β ? Hacer un diagrama como la fig. 39R.

23. Si uno de los fragmentos de la fisión del U-235 es el isótopo radiactivo kriptón-95, ¿en qué isótopo estable se convertirá si ocurre una serie de emisiones de partículas β ? Hacer un diagrama como la fig. 39R. (Resp. $^{95}_{42}\text{Mo}$.)

24. Si se bombardea una pequeña cantidad de curio-247 con deuterones y se producen partículas β , ¿cuál es la reacción completa?

25. Cuando se bombardea americio-243 con deuterones de un ciclotrón, se emiten partículas α . ¿Cuál es la reacción completa? (Resp. $^{243}_{95}\text{Am} \rightarrow ^{245}_{96}\text{Cm} + ^4_2\text{He}$.)

40

ENERGIA NUCLEAR Y PARTICULAS ELEMENTALES

40.1 Una reacción en cadena. Poco después del descubrimiento de la fisión se hizo evidente para muchos grupos científicos de América y Europa que si se podía aislar una cantidad suficiente de uranio-235 (U-235) de sus isótopos más abundantes, uranio-238 (U-238), podría tener poderes explosivos, muchas veces mayores que cualquier cosa conocida hasta entonces. Las razones para creer esto parecían entonces algo como lo siguiente. Suponiendo que se juntase en un solo trozo una cantidad dada de metal uranio, sólo de átomos de uranio-235; el primer rayo cósmico que penetrase en esta masa y produjese un neutrón, podría iniciar una reac-

ción en cadena como se ilustra en la figura 40A. Un núcleo de U-235 atraparía al neutrón y, al romperse con gran violencia, liberaría uno o más neutrones adicionales. Éstos, a su vez, podrían ser absorbidos rápidamente por otros átomos cercanos que también se romperían con la liberación de otros neutrones. Así podría ocurrir una especie de alud, de un tipo que, si fuera suficientemente rápido, tendría las características de una explosión. En la figura 40B se tiene una gráfica de la rapidez de crecimiento de este proceso en cadena

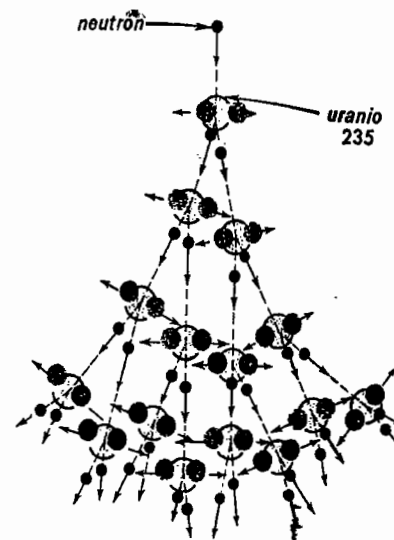


Fig. 40A. Diagrama de una reacción en cadena en uranio-235 puro.

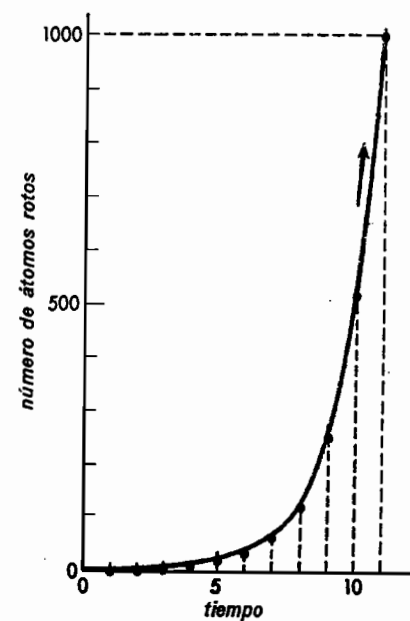


Fig. 40B. Curva de crecimiento de la fisión en uranio-235 puro.

Ya que aun los neutrones más lentos dentro de la materia sólida tienen una velocidad media de cerca de 200 m/seg y que en promedio ocurrirán en menos de un centímetro muchas colisiones de neutrones, la gráfica muestra lo rápidamente que el crecimiento llega a proporciones gigantescas. (La escala de tiempo está en microsegundos.)

El escape de neutrones de cualquier cantidad de uranio es un fenómeno de superficie que depende del área de ella, mientras que la captura y fisión ocurren dentro de todo el objeto y, por tanto, son un efecto de volumen. Si la masa reunida de uranio fuese demasiado pequeña, la probabilidad de que la mayoría de los neutrones liberados por la fisión se escapen por la superficie antes de ser capturados podría ser tan grande que no ocurriría una reacción creciente en cadena. Como el volumen de una esfera crece con el cubo del radio y la superficie aumenta con el cuadrado del radio, la probabilidad de escape disminuirá al aumentar el tamaño. En otras palabras, si la masa de uranio fuera demasiado pequeña, el proceso de crecimiento señalado en las figuras 40A y 40B, quedaría detenido antes de llegar a ser grande y sólo cuando la masa fuese mayor de cierto valor crítico ocurriría una explosión.

Considérese, por tanto, una cantidad grande de U-235 en dos o más unidades, cada una menor que el tamaño crítico y

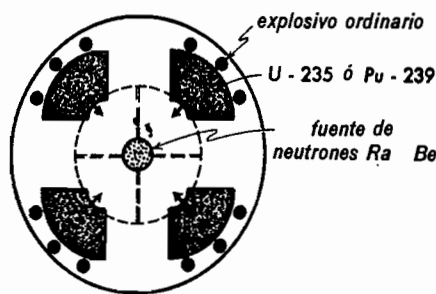


Fig. 40C. Diagrama de un aparato explosivo atómico, basado en una rápida reacción en cadena de U-235 o Pu-239 puros.

separadas una corta distancia. Ver la figura 40C. Debido a la grande relación de área de cada unidad, los neutrones escaparían rápidamente y no se desarrolla la reacción en cadena. De repente se detona un explosivo como TNT, detrás de los trozos separados, haciéndolos que se junten como se indica en el centro del diagrama. Los neutrones que entren a esta masa mayor que la crítica viniendo de una fuente de Ra-Be, iniciarán ahora una rápida reacción en cadena que se traducirá en una violenta explosión. La tremenda liberación de energía de este aparato sólo puede comprenderse por completo por aquellos que la han visto y oído realmente.

La primera bomba atómica fue montada por científicos en el Laboratorio Los Álamos, de la Universidad de California, y fue disparada con éxito en Alamogordo, Nuevo México, el 16 de julio de 1945. Esta bomba estaba compuesta prácticamente de U-235 puro. Desde entonces se han detonado muchas armas atómicas en que se ha usado plutonio 239 como material fisionable y ahora en muchas partes se estudian los usos pacíficos de toda clase de explosiones nucleares.

Uno de estos desarrollos prometedores aprovecha la tremenda cantidad de energía calorífica liberada. Se puede confinar en un espacio relativamente pequeño una serie repetida de explosiones y puede extraerse el calor por medio de un sistema intercambiador de calor, como tuberías de vapor circulante, etc.

40.2 Radio nuclear y sección transversal geométrica. Muchos de los experimentos relacionados con choques entre partículas atómicas indican que el pesado núcleo se puede considerar como un conglomerado de esferas estrechamente amontonadas. Ahora se cree que el radio promedio de un nucleón es

$$r_0 = 1.2 \times 10^{-13} \text{ cm} \quad (40a)$$

Si se amontonan esferas de este tamaño en una estructura en forma de bola, como

en la fig. 39O(a), el radio aproximado del sistema estará dado por

$$R = r_0 \sqrt[3]{A} \quad (40b)$$

donde el número de nucleones está dado por el número de masa A . Para el núcleo de uranio, U-235, por ejemplo, $A = 235$ y $R = 7.4 \times 10^{-13} \text{ cm}$, un valor sólo seis veces mayor que el radio del protón.

El concepto de *sección transversal nuclear* es de considerable importancia en estudios nucleares. Si se pone un núcleo como blanco para que choque con el otro átomo, su sección transversal sirve como una medida razonable del tamaño del blanco y viene dada por

$$\sigma_g = \pi R^2 \quad (40c)$$

Para el U-238 esta sección transversal es aproximadamente

$$\sigma_g = 1.72 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \quad (40d)$$

El área unidad para los núcleos se ha establecido arbitrariamente como $1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ y se llama un barn. La sección transversal geométrica para el U-238, por ejemplo, se escribiría $\sigma_g = 1.72 \text{ barns}$.

En la Tabla 40A se dan las secciones transversales calculadas para unos pocos núclidos, junto con la altura de la barrera nuclear B para la incidencia de partículas α . (Ver la fig. 39H.)

TABLA 40A. RADIO, SECCIÓN TRANSVERSAL GEOMÉTRICA Y ALTURA DE BARRERA DE POTENCIAL NUCLEARES

Núclido	R (10^{-13} cm)	σ_g (barns)	B Mev
${}^4_2\text{He}$	1.90	0.11	2.4
${}^{16}_8\text{O}$	3.03	0.29	6.0
${}^{64}_{30}\text{Zn}$	4.80	0.72	14.0
${}^{113}_{48}\text{Cd}$	5.85	1.07	19.0
${}^{252}_{100}\text{Fm}$	7.58	1.78	29.0

40.3 Secciones transversales. Cuando inciden neutrones sobre algún material, el área del blanco o sección transversal de

los núcleos que contiene parece ser diferente para distintas velocidades del neutrón. Por ejemplo, para neutrones rápidos la sección transversal puede ser relativamente pequeña, mientras que para neutrones lentos puede ser muchas veces mayor. Con esta explicación, vemos que la sección transversal no es necesariamente un área en el sentido literal, sino que es una sección transversal figurada σ , y por simplicidad, la probabilidad de una interacción.

La probabilidad de la interacción entre un neutrón y un núcleo se llama la sección transversal microscópica σ , y, para simplificar el concepto, se puede imaginar como el área efectiva de ese núcleo como blanco. Si incide un haz de neutrones en un centímetro cúbico de material, como se ve en la fig. 40D, el área efectiva total de

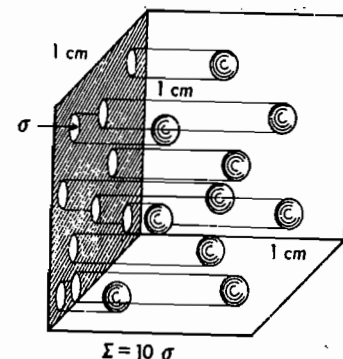


Fig. 40D. Diagrama de la sección transversal microscópica y del significado de la sección transversal macroscópica.

blanco será $n\sigma$, donde n es el número total de átomos por cm^2 . Este producto se llama área transversal macroscópica, y se designa con Σ .

$$\Sigma = n\sigma \quad (40e)$$

La sección transversal total σ_t de un solo núclido es la suma de varias secciones transversales, una para cada diferente proceso que pueda alterar la energía o cantidad de movimiento de las partículas con que se bombardea.

$$\sigma_t = \sigma_c + \sigma_s + \sigma_f \quad (40f)$$

donde σ_s es el área nuclear efectiva que produce una dispersión medible, σ_c es el área efectiva para capturas previas a la emisión radiactiva y σ_f es el área efectiva para la captura previa a la fisión.

En el proceso de dispersión, la partícula incidente no es capturada por el núcleo, sino que sale lanzada en una nueva dirección. Para los núcleos que no se fisionan, $\sigma_f = 0$.

Como ilustración de estas varias sigmas, se dan en la Tabla 40B y en la 40C las secciones transversales de los núclidos fisionables. La Tabla 40B da las secciones transversales para el U-235 solamente y presenta las diferencias en área de blanco para neutrones rápidos y lentos. Los neutrones de 2 Mev tienen una rapidez de 20 000 000 m/seg, mientras que los neutrones térmicos (0.0253 ev) tienen una rapidez de 2 200 m/seg.

TABLA 40B. SECCIONES TRANSVERSALES EN BARNS PARA U-235 PURO

	σ_s	σ_c	σ_f
Neutrones rápidos	5.0	0.25	1.27
Neutrones térmicos (neutrones lentos)	10.0	107	580

TABLA 40C. SECCIONES TRANSVERSALES EN BARNS PARA NEUTRONES TÉRMICOS EN MATERIALES FISIONABLES

Núclido	σ_s	σ_c	σ_f
U-235	10	107	580
Pu-239	9.6	315	750
U-233	...	52	533
U-238	8.3	3.50	0

40.4 Factores de masa crítica. Para que sea explosiva una masa de material fisionable, como el U-235 puro, debe ser muy pequeño el tiempo entre eventos de fisión y deben escapar por la superficie, o ser perdidos por captura en otros materiales

diferentes del uranio, relativamente pocos núcleos. En la fig. 40E se ve un diagrama de caminos posibles de neutrones entre dos acontecimientos de fisión consecutivos.

Empezando como neutrones rápidos, pierden considerable energía con cada impacto no elástico. Conforme la velocidad del neutrón disminuye, el área transversal de fisión del U-235 aumenta y la captura para fisión se hace más y más probable.

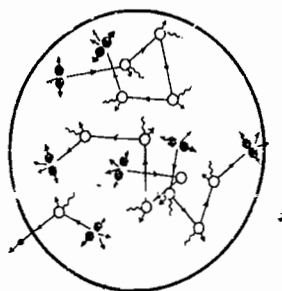


Fig. 40E. Diagrama esquemático de dispersión no elástica entre realizaciones de fisión en U-235 ó Pu-239.

El que una masa sostenga o no una reacción en cadena se determina por lo que se llama *factor de reproducción*. El factor de reproducción k está dado por la relación.

$$k = \frac{\text{rapidez de producción de neutrones}}{\text{rapidez de desaparición de neutrones}} \quad (40g)$$

Si la rapidez de producción iguala a la rapidez con que desaparecen los neutrones, se dice que la masa es crítica y $k = 1$.

En la fig. 40F se dan las curvas que muestran el crecimiento en un conjunto en que k es ligeramente mayor y ligeramente menor que la unidad. Como una generación de neutrones requiere cerca de un microsegundo, la escala horizontal puede representar el tiempo en microsegundos.

La curva de $k = 1.1$ sube en cinco generaciones a

$$1.1 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.1 \times 1.1 = 1.61 \text{ neutrones}$$

Esta misma curva sube en diez generaciones a $(1.1)^{10}$ ó 2.59 neutrones y en 100 generaciones a $(1.1)^{100}$ ó 13 770 neutrones. En 1 000 generaciones, o sea, aproximadamente un milésimo de segundo, sube el número aproximadamente a 1×10^{41} neutrones. Como éstos son más que los átomos que puede haber en cualquier masa de uranio empleada en una sola ocasión hasta ahora, no ha llegado el caso de producir 1 000 generaciones de neutrones.

La masa crítica de un aparato explosivo nuclear debe estar entre el tamaño de una canica (2 cm de diámetro) y el tamaño de una bola de básquetbol (24 cm de diámetro). Imagíne por tanto, dos

esferas de U-235 ó Pu-239 puro, una doce veces mayor que la otra en diámetro. Resulta claro que si la distancia media en línea recta entre las realizaciones de fisión es de 6 cm, se capturarán pocos neutrones en la esfera pequeña, mientras que en la masa grande se capturarán casi todos. En el U-235 ó Pu-239 puro, del tamaño de la canica, el factor de reproducción es aproximadamente 0.1, mientras que en la esfera de tamaño de balón, $k = 2.4$.

40.5 Reactores nucleares. Un reactor nuclear, a veces llamado pila atómica, es un aparato en que puede mantenerse la fisión nuclear como una reacción en cadena controlada y que se mantiene por sí misma. Es una especie de horno en que el *combustible quemado* es el uranio, y se liberan muchos productos útiles como calor, neutrones e isótopos radiactivos.

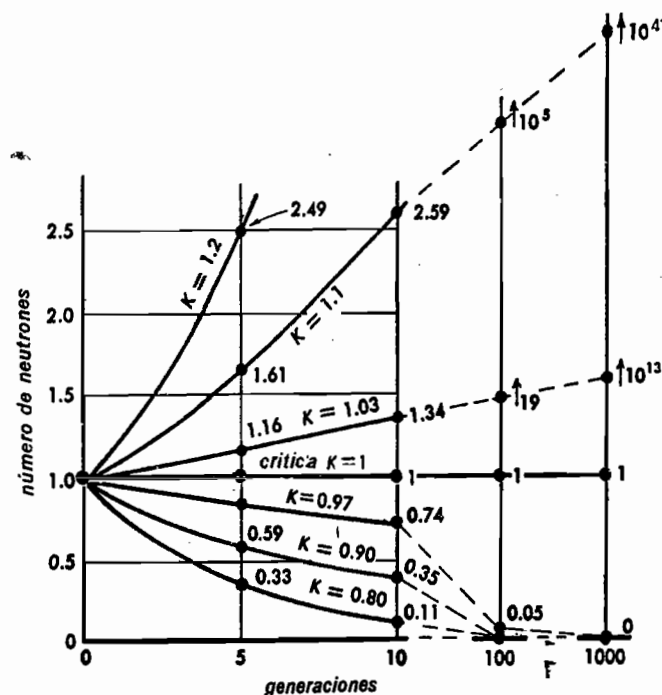


Fig. 40F. Curvas de crecimiento de neutrones con factores de reproducción ligeramente encima y debajo del crítico, $k = 1$.

Hay reactores de muchas clases, tamaños y formas, siendo los factores principales la cantidad de material fisionable y la sustancia moderadora que retarda los neutrones hasta velocidades térmicas. Un reactor se diseña frecuentemente dependiendo del moderador o enfriador que se va a usar en él. Ya que el tema es amplísimo, sólo se describirán aquí los elementos más simples de estos aparatos para que ilustren los principios básicos de muchos otros.

El metal uranio, normalmente refinado, está compuesto de tres isótopos radiactivos.

U-238	99.28%
U-235	0.714%
U-234	0.006%

No se puede lograr que se mantenga por sí sola una reacción en cadena con uranio puro solo, independientemente del tamaño de su masa. Combinando o rodeando el metal con un moderador apropiado, los neutrones de 2 Mev producidos en la fisión del U-235 pueden frenarse mediante colisiones elásticas en el moderador hasta energías térmicas de 0.0253 ev. A estas velocidades relativamente bajas de 2 200 m/seg, la sección transversal de fisión del U-235 tiene el valor enorme de 580 barns, ver Tabla 40B.

La primera reacción en cadena continuada obtenida por el hombre se puso en operación en la Universidad de Chicago en diciembre 2 de 1942. Este aparato consistía en una gran pila de cubos de carbón cuidadosamente acomodados uno junto a otro para formar una masa sólida como del tamaño de un salón de clase. Al construirla se insertaron trozos de uranio puro metálico a intervalos regulares dentro de la masa.

En la fig. 40G se ve un esquema de la pila construida con cubos grandes de carbón. Los agujeros largos, cilíndricos, a través de los cubos, sirven para insertar o extraer los elementos de combustible, varillas de control, aparatos detectores, muestras que van a recibir radiación, etc. Los elementos de combustible consisten en ura-

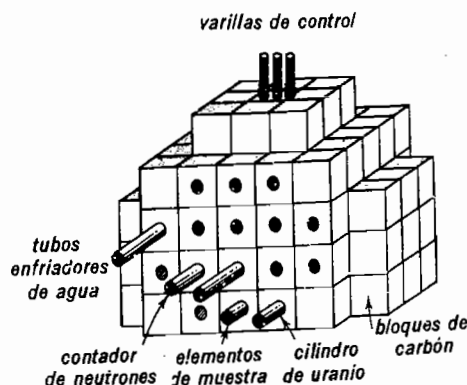


Fig. 40G. Pila de uranio de cubos de carbón usada para producir plutonio-239 y muchos otros núcleos atómicos radiactivos. (No se muestran las paredes protectoras de concreto.)

nio metálico puro, sellado en cilindros de aluminio de paredes delgadas.

La distancia que separa los elementos de uranio dentro del material moderador es importante en el diseño del reactor. Las distancias de enfrenado para tres moderadores usados comúnmente son las siguientes:

agua ordinaria	H ₂ O	5.7 cm
agua pesada	D ₂ O	11.0 cm
cubos de carbón	C	19.0 cm

Cuando unos pocos U-235 sufren fisión dentro del metal uranio, se liberan neutrones rápidos. La mayoría de éstos entran al carbón que lo rodea (el moderador) donde chocan elásticamente con núcleos

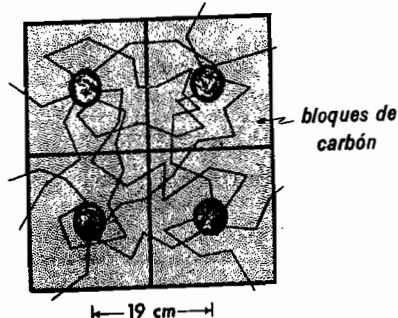


Fig. 40H. Diagrama de la acción del moderador en un reactor atómico. Los choques elásticos de los neutrones con los núcleos de carbono frenan los neutrones hasta energías térmicas.

de carbono y disminuyen su velocidad. En ocasiones, muchos de ellos entran al metal uranio como neutrones térmicos, y son capturados por núcleos de U-235 y los fisionan. Este proceso se ve en el diagrama dado en la fig. 40H.

No todos los neutrones producidos dentro del reactor llegan a ser capturados por el U-235. Algunos se pierden por escape a través de la superficie, otros por captura radiactiva en U-235 y en U-238 y algunos por captura en los materiales de la estructura y en los productos de la fisión. La captura radiactiva es un término aplicado a la captura de un neutrón por un núcleo que se convierte en un núcleo radiactivo.

El balance de neutrones en un reactor de uranio natural operando en sus condiciones críticas, $k=1$, se da en la fig. 40I.

De los millones de neutrones rápidos producidos cada microsegundo en el reactor, empieza el diagrama con 1 000 neutrones rápidos en el centro y muestra razonablemente lo que puede ocurrirles para regenerar otros 1 000 neutrones rápidos. El número promedio de neutrones producidos en cada fisión es de 2.5. Este factor interviene directamente en los cuatro cuadros de abajo donde se emplea para el recuento de la reproducción. Debe notarse que 60% de los neutrones desaparecen en otros procesos ajenos a la fisión.

Si el factor de reproducción k del reactor es mayor a la unidad —ver la ec. (40g)—, el número total de neutrones aumentará y con él subirá la temperatura. Para evitar que suba ésta, se bajan dentro del corazón central las varillas de control, que son fuertes absorbentes de neutrones.

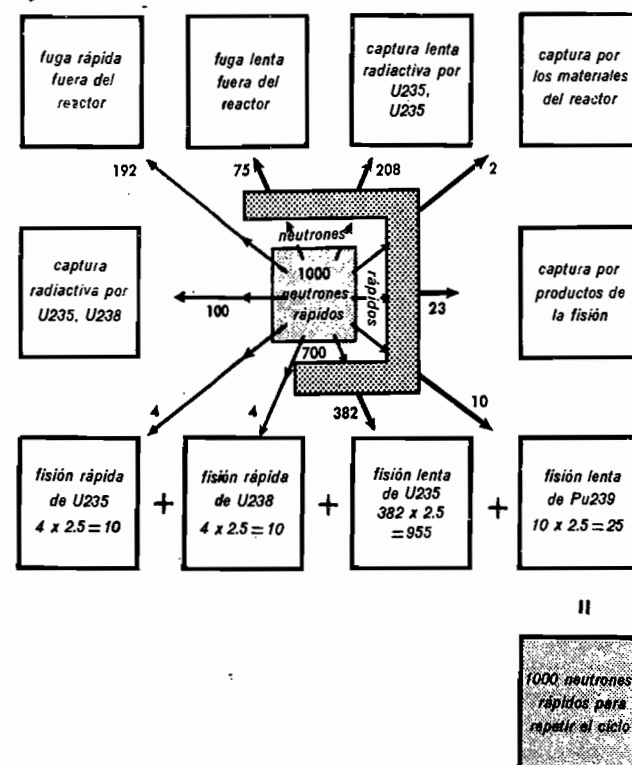


Fig. 40I. Diagrama mostrando el balance de neutrones en un reactor de uranio natural en régimen crítico. (Números calculados por cortesía de Westinghouse Electric Corp.)

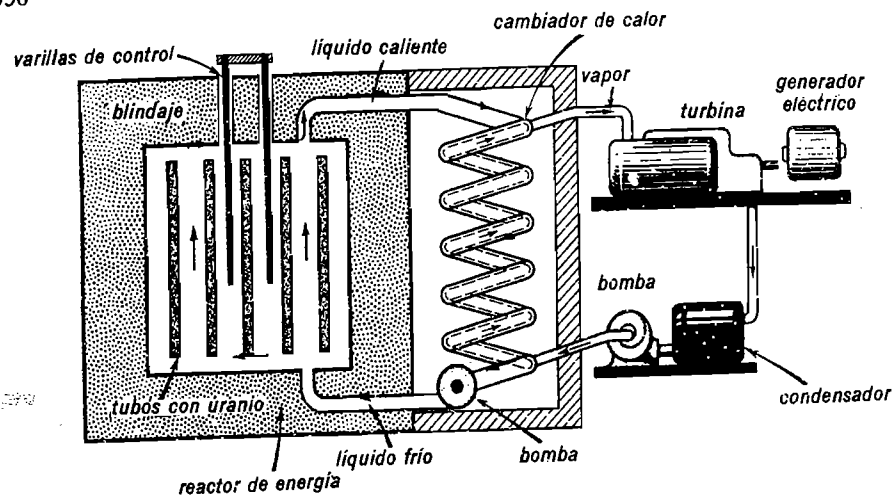


Fig. 40J. Diagrama típico de una central de energía nuclear.

Las varillas o placas de control, más comúnmente usadas, contienen boro o cadmio. Estos elementos tienen secciones transversales enormes para neutrones lentos. Cuando se somete el metal cadmio normal al bombardeo de neutrones térmicos, su sección transversal promedio es de 2500 barns.

40.6 Reactores de energía o centrales nucleares de energía. La idea de que se puede utilizar el calor natural desarrollado en un reactor de uranio como fuente de gran energía se reconoce desde hace tiempo como una empresa realizable. En la figura 40J se muestran los principios básicos de un tipo de reactor de energía. El centro de la fuente de energía lo forma una cantidad de uranio enriquecido, en forma de metal puro o de solución de una sal soluble en agua.

La energía liberada por la fisión produce grandes cantidades de calor y la elevación de temperatura se regula a un valor predeterminado por medio de varillas de cadmio. Para reducir la rapidez de la fisión, y con ello bajar la temperatura, se empujan las varillas de control un poco hacia adentro para absorber más neutrones, mientras que para subir la temperatura se extraen un poco.

Debido a los efectos nocivos de la intensa radiación de neutrones sobre los hombres y el equipo, no es posible evaporar directamente en el líquido como en una caldera de vapor; es mejor hacer circular un fluido a través del reactor blindado y de un intercambiador de calor, como se ve en el diagrama.

El líquido caliente que fluye a través del cambiador de calor, evapora otro líquido más volátil, como el agua, y el vapor a presión o los gases calientes que se producen, impulsan una turbina de diseño especial. La turbina, a su vez, mueve un generador eléctrico produciendo energía que puede usarse para alumbrar ciudades y fábricas o para impulsar barcos y submarinos en el agua o grandes aeroplanos.

Uno de los problemas relacionados con los reactores de energía se refiere al efecto de la radiación de neutrones sobre las estructuras metálicas. Los neutrones cambian algunos átomos y desplazan permanentemente a otros fuera de su posición normal en las capas cristalinas de los sólidos y como consecuencia, debilitan ciertas partes mecánicas fundamentales. Actualmente se están realizando estudios intensos de las propiedades de varios materiales bajo las condiciones que han de encontrarse probablemente en los reactores de energía.

40.7 La energía del Sol. Las medidas de la radiación solar que llegan a la Tierra, no tan sólo hacen posible el cálculo de la temperatura de la superficie del Sol, sino que también determinan su radiación total. El hecho de que el Sol no muestre signo de enfriamiento en un período de muchos años, había sido por mucho tiempo un misterio insoluble. Este misterio se ha resuelto recientemente, por lo menos en parte, con el descubrimiento de la desintegración nuclear y el desarrollo de los métodos de producción de varios átomos nuevos.

Aunque no se conoce ninguna manera directa de observar el interior de una estrella, como nuestro Sol, los cálculos matemáticos, basados en leyes físicas bien establecidas, señalan que muy adentro de esta masa, la temperatura es tan extremadamente elevada que la materia puede existir como un conglomerado de átomos, electrones y ondas luminosas, moviéndose todos a velocidades enormemente altas.

Cerca del centro del Sol, donde la temperatura es de unos 20 millones de grados, los átomos están despojados de sus electrones y las ondas de luz allí producidas son de tan alta frecuencia que deben clasificarse como rayos γ y rayos X. Donde la velocidad promedio de las partículas es tan elevada, deben estar ocurriendo reacciones nucleares en grandes proporciones, y la energía liberada debe estarse filtrando a través de las capas exteriores, cada vez más frías, como ondas de luz de frecuencia cada vez más baja. La mayoría de las radiaciones que escapan por la superficie, son de frecuencia suficientemente baja para que se les clasifique como luz visible, ultravioleta e infrarroja.

Un estudio cuidadoso de todas las reacciones nucleares conocidas, llevó a Bethe en 1938 a proponer el siguiente grupo de procesos en cadena, como los que más probablemente ocurren en la generación de la energía en el núcleo central del Sol.

- 1) ${}_1\text{H}^1 + {}_6\text{C}^{12} = {}_7\text{N}^{13} + \text{rayo } \gamma$
- 2) ${}_7\text{N}^{13} = {}_8\text{O}^{13} + {}_1\text{H}^1$

- 3) ${}_1\text{H}^1 + {}_6\text{C}^{13} = {}_7\text{N}^{14} + {}_0\text{e}^0 \gamma$ (40h)
- 4) ${}_1\text{H}^1 + {}_7\text{N}^{14} = {}_8\text{O}^{15} + \text{rayo } \gamma$
- 5) ${}_8\text{O}^{15} = {}_7\text{N}^{15} + {}_1\text{H}^1$
- 6) ${}_1\text{H}^1 + {}_7\text{N}^{15} = {}_6\text{C}^{12} + {}_2\text{He}^4$

Al sumar las ecuaciones se verá que se consumen cuatro átomos de hidrógeno y se crean dos positrones, tres rayos γ y un núcleo de helio. Los otros núcleos se suprimen en el balance total, ya que el átomo original de carbono de la primera reacción, se regenera sin ningún cambio en la última reacción. Por lo tanto, se está quemando hidrógeno y se está liberando helio. La pérdida de masa en este ciclo de reacciones, es entonces la siguiente:

$$\begin{aligned} 4 {}_1\text{H}^1 &= 4.0324 \\ {}_2\text{He}^4 &= 4.0039 \\ 2 {}_0\text{e}^0 &= 0.0010 \end{aligned}$$

Por resta se obtiene $4.0324 - 4.0039 - 0.0010 = 0.0275$ uam. Esto equivale a unos 27 Mev de energía.

Los experimentos y cálculos más recientes,* indican que el ciclo protón-protón, es de mayor importancia que el ciclo de carbono, en la creación de la energía solar y estelar.

$$\begin{aligned} {}_1\text{H}^1 + {}_1\text{H}^1 &= {}_2\text{He}^2 + {}_0\text{e}^0 + 0.93 \text{ Mev} \\ {}_1\text{H}^1 + {}_2\text{He}^3 &= {}_3\text{He}^3 + \text{rayo } \gamma + 5.5 \text{ Mev} \\ {}_3\text{He}^3 + {}_3\text{He}^3 &= {}_4\text{He}^4 + 2 {}_1\text{H}^1 + 12.8 \text{ Mev} \end{aligned}$$

El resultado final es el mismo de antes; habiéndose convertido cuatro átomos de hidrógeno en un átomo de helio. Nótese que ya que están incluidos en la reacción de la ec. (40d) dos núcleos de ${}_2\text{He}^3$, se requieren dos reacciones protón-protón del tipo de la ecuación (40b) para formar un núcleo ${}_2\text{He}^4$. Se consume seis protones, pero se regresan dos con el helio.

La velocidad con que tienen lugar estas reacciones, no sólo concuerda con la temperatura de 20 millones de grados, calculada a partir de otras consideraciones, sino que se sabe que el hidrógeno y el

* Ver "Nuclear Reactions in Stars", por E. E. Salpeter, Physical Review, vol. 88, 1952, página 547.

helio son los elementos más abundantes en la constitución de las estrellas.

Para que el Sol irradie 3.8×10^{33} ergios de energía por segundo, la ecuación de Einstein, $E=mc^2$, indica que la masa debe estarse aniquilando a razón de 4.2×10^{12} g/seg (o sea, 4 200 000 ton/seg). Aunque este resultado indica que el Sol está perdiendo masa con tremenda rapidez, la cantidad es pequeña comparada gramos. Dicho más claramente, en un millón de años el Sol pierde una diezmilésima parte de su masa total.

40.8 Partículas elementales. Por muchas décadas, los físicos han buscado las partículas mínimas de que está compuesta la materia. Del átomo y su estructura de electrones se ha extendido la busca al interior del núcleo y del núcleo a la estructura de los mismos nucleones.

La planeación y construcción de aceleradores atómicos que producirán más y más altas energías llegando a las regiones de los Bev y cientos de Bev, han sido y seguirán siendo en el futuro, realizados para golpear más y más energicamente a los núcleos. Cuando con una partícula de muy alta energía se destroza a un núcleo, se produce, con frecuencia, amplia variedad de partículas.

Las preguntas relacionadas con el origen y naturaleza de estas partículas presentan retadores problemas, tanto a los experimentadores como a los teóricos. ¿Existen estas partículas en alguna extraña forma dentro del núcleo, o son creadas por la liberación de masa y energía en el impacto? Si son creadas, ¿cuál es el mecanismo creador?, ¿cuánto duran y en qué termina su energía?

En estas últimas secciones daremos un breve vistazo a algunos descubrimientos y observaciones recientes en la física de alta energía, con la esperanza de que ello pueda sembrar algún interés y dar al lector alguna clave sobre los nuevos experimentos que se puedan realizar para aportar nueva luz sobre estas partículas elementales.

Con el descubrimiento del neutrón por Chadwick en 1932, llegó a cuatro el número de partículas elementales: el electrón, el protón, el neutrón y el fotón. Las tres primeras son partículas atómicas, con las cuales está construido el átomo, mientras que el fotón es la unidad cuántica de radiación emitida o absorbida por el electrón en la estructura externa de los átomos o por las partículas dentro del núcleo.

El fotón sólo puede existir cuando viaja con la velocidad de la luz y a causa de su movimiento posee la energía $h\nu$. Por la relación de masa energía $E=mc^2$, un fotón también tiene masa $h\nu/c^2$; posee masa también en virtud de su movimiento, pero en reposo no tendría energía ni masa.

El electrón, protón y neutrón, por otra parte, tienen una masa en reposo y una energía en reposo definidas. Cuando se ponen en movimiento aumentan su masa.

40.9 Antipartículas. El positrón, descubierto por Anderson en 1932, es un electrón con carga positiva. Hemos visto en la Sección 36.8 cómo se puede crear pares de electrones y cómo se aniquilan al reunirse un positrón y un electrón y se convierten en dos rayos γ . Esta propiedad del positrón es la que le da el nombre de *antipartícula* —se destruye a sí misma juntamente con un electrón y se convierte en otra forma de energía.

Ahora sabemos que cuando un fotón de alta energía se acerca a un núcleo, pueden producirse dos mesones. Si se producen dos mesones π , uno positivo y otro negativo, uno es la antipartícula del otro.

40.10 Clasificación de partículas. La lista de todas las partículas elementales conocidas hasta ahora ha llegado al colosal número de 30. La mayoría de las partículas tienen media vida muy corta y la mitad de ellas son antipartículas.

La tabla de la fig. 40K presenta las partículas normales a la izquierda, en negro, y las antipartículas a la derecha, en rojo. Están colocadas según su masa, en orden decreciente, con sus números baryón

masa xm ₀	spin	número baryon						spin isotópico
		+1	+1	+1	-	0	+	
2586	1/2	Σ^-	Σ^0	Σ^+		Ξ^-	Ξ^0	1/2
2335	1/2	Σ^-	Σ^0	Σ^+	Σ^-	Σ^0	Σ^+	1
2185	1/2		Λ^0			Λ^0		0
1836	1/2		neutrón n^0	protón p^+	anti-protón p^-	anti-neutrón n^0		1/2
966	0		K^0	K^+	K^-	K^0		1/2
270	0	π^-			π^0		π^+	1
207	1/2	μ^-					μ^+	
1	1/2	electron e^-					positron e^+	
0	1/2		neutrino ν^0			anti-neutrino ν^0		
0	1			fotón $h\nu$				
		-	0	+	-	0	+	
		carga			antipartículas			

Fig. 40K. Tabla de partículas y antipartículas elementales, dando su clasificación, masa, carga, símbolo y varios números cuánticos.

arriba transversalmente (sólo para los baryones), su giro nuclear, I , a la izquierda, y su carga eléctrica transversalmente, abajo. Notar que la mitad izquierda de la tabla es prácticamente una imagen reflejada de la mitad derecha.

El término *baryón* se aplica a neutrones y protones y a las partículas de masa mayor.

El fotón $h\nu$ y el mesón π^0 se colocan en la línea central porque difieren del resto en un aspecto importante; cada una de estas partículas actúa como su propia antipartícula.

La muy interesante idea lanzada de que algunas galaxias distantes en el cielo pueden estar formadas de antimateria, bien

puede ser cierta. En estas galaxias todos los átomos de hidrógeno estarían formados por antiprotones y positrones, siendo sus antipartículas los protones y electrones. Por tanto, la fig. 40K tiene un doble significado; cualquiera mitad representa las antipartículas de la otra mitad.

40.11 Baryones y partículas extrañas.

Las partículas más pesadas de los cuatro primeros renglones de la tabla, fig. 40K, son llamados *baryones*, y junto con los mesones forman un grupo mayor llamado de *partículas extrañas*. Aunque la mayoría de estas partículas fueron descubiertas como resultados extraños en los rayos cósmicos, ahora pueden producirse en el laboratorio

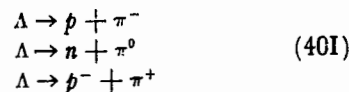
con el haz de protones de un acelerador de alta energía.

El nombre de hiperón se aplica con frecuencia a todas las partículas elementales de masa mayor que la de un neutrón o un protón.

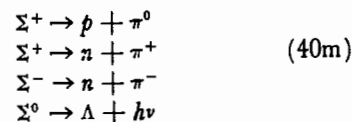
Recorriendo la tabla de arriba a abajo se verá que ya hemos estudiado los leptones y sus propiedades, así como los mesones π y los nucleones. Los demás, se describen brevemente a continuación.

Partículas kappa (K). Estas partículas elementales pertenecen a la clase de los mesones y no tienen cantidad de movimiento angular de giro. Siendo más pesadas que los mesones π , son otras formas posibles de degradación hacia otras partículas. Las partículas K^+ tienen vida media de 0.85×10^{-8} seg y generalmente se degradan a mesones π .

Partículas lambda (Λ). Estas partículas pertenecen a la clase de los baryones y, por ser más pesadas que los nucleones, son llamadas hiperones. Su masa es cerca de 70 masas de electrón por encima de la del protón, más un pion y se degradan principalmente de los siguientes modos:



Partículas sigma (Σ). Los hiperones son de tres clases, Σ^+ , Σ^0 y Σ^- y pertenecen a la clase de los baryones. Tienen un *spin* de $\frac{1}{2}(h/2\pi)$ y se degradan principalmente a neutrones, protones y piones. Los piones son mesones π .



40.12 La cámara de burbujas. La cámara de burbujas, inventada en 1952 por D. H. Glaser, ha resultado uno de los más valiosos instrumentos para el estudio de los pequeños detalles de los acontecimientos nucleares de alta energía. En una cámara de niebla, se forman gotas sobre los iones

producidos por partículas atómicas cargadas que acaban de atravesar por la cámara llena de gas. En la cámara de burbujas se forman pequeñas burbujas sobre los iones producidos por una partícula cargada que haya pasado recientemente por un líquido.

Los principios básicos de la cámara de burbujas, incluyen el sobrecalentamiento de un líquido y la formación de burbujas en el proceso de ebullición. El agua, por ejemplo, hierve a 100°C a la presión atmosférica normal. Si se eleva la presión, como en los geisers, fig. 17H, no se iniciará la ebullición hasta que se llegue a una temperatura más alta. Por tanto, se aumenta la presión y se eleva la temperatura casi hasta la nueva temperatura de ebullición. Si entonces se baja la presión bruscamente, se inicia la ebullición con la formación repentina de pequeñas burbujas que crecen rápidamente de tamaño.

En la fig. 40L se ve un diagrama simplificado de una cámara de burbujas. Una

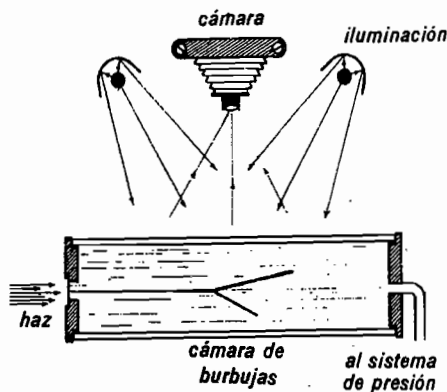


Fig. 40L. Corte transversal de una cámara de burbujas mostrando la iluminación de las trayectorias, la cámara y el haz incidente de partículas.

caja de gruesas paredes de vidrio y llena con un líquido, está conectada a un sistema de presión y se la sobrecalienta a una temperatura previamente determinada. A través de una ventana delgada entran partículas de alta energía. La brusca apertura de una válvula en el sistema de

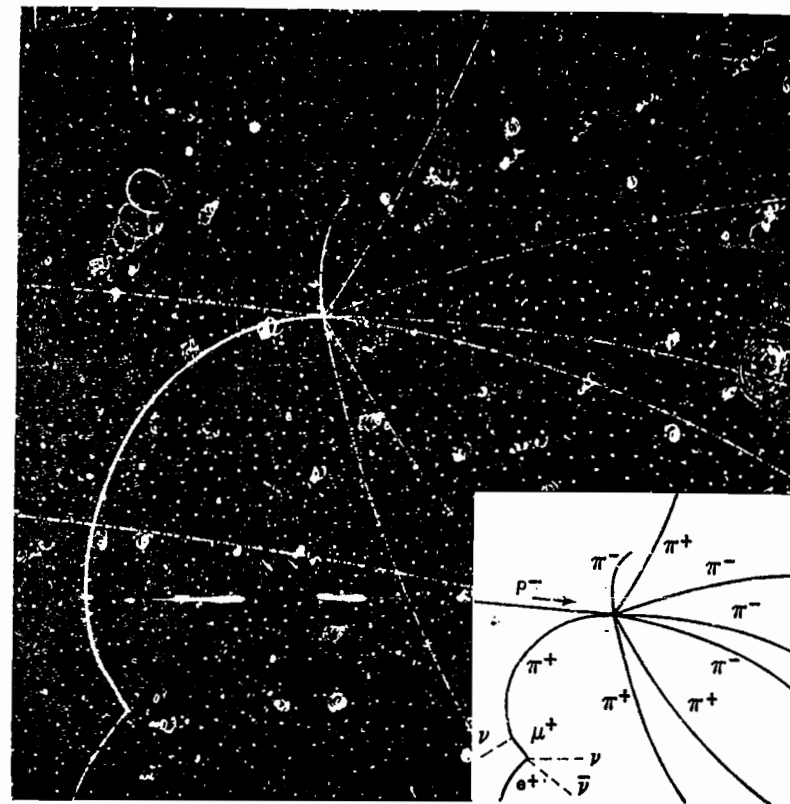


Fig. 40M. Estrella de mesones producida por la captura de un antiprotón en un protón en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido. (Cortesía de L. Alvarez y colaboradores.)

presión va seguida inmediatamente por el encendido de las lámparas de iluminación y el disparo de la cámara. Si se da el tiempo apropiado a la cámara, se fotografían los rastros de burbujas que se han formado en la hilera de iones producidos por las partículas que atravesaron el campo. Ver la fig. 40M.

El uso de hidrógeno líquido en las cámaras de burbujas ha sido particularmente efectivo en el estudio de los eventos con partículas elementales y extrañas. Las técnicas con que ha de manejarse el hidrógeno líquido a -253°C en las cámaras grandes de burbujas, han sido desarrolladas por L. Alvarez y sus colegas en un período de varios años. El hidrógeno líquido es particularmente útil porque presenta como blanco una alta concentración

de protones, los núcleos atómicos más simples y a la vez acorta grandemente la distancia entre eventos que sería necesaria en una cámara de niebla llena de gas.

Se acostumbra colocar las cámaras de burbujas en el centro de un electroimán grande para que, por la curvatura del rastro, se pueda obtener la carga y cantidad de movimiento de la partícula.

40.13 Antiprotones. La existencia de los antiprotones fue descubierta en 1955 por Chamberlain, Segre, Wiegand e Ypsilantis en la Universidad de California. Este descubrimiento fue el resultado de planes de largo alcance para buscar la respuesta a la pregunta: "¿hay una partícula de igual masa que el protón pero con carga negativa?" Uno de los propósitos principales

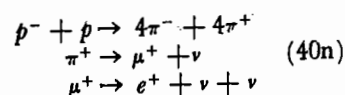
para los que se construyó el acelerador de protones de 6.2 Bev, en 1953, fue el encontrar una respuesta a esta pregunta. Los protones acelerados a energía suficientemente alta, al chocar con núcleos más pesados deberían impartir suficiente energía para crear, si fuera posible, un par de protones, uno positivo y otro negativo.

Los primeros antiprotones fueron descubiertos como partículas altamente negativas saliendo de un blanco de cobre en el haz de protones del bevatrón. Por medio de un imán potente se desviaron los antiprotones y se llevaron a un contador de centelleos. Actualmente son comúnmente observados y estudiados los acontecimientos con antiprotones por medio de la cámara de burbujas.

La fig. 40M es una fotografía en la que entra un antiprotón por la izquierda de la cámara de burbujas. Cerca del centro de esta foto choca con un protón y se

aniquilan las dos partículas en la producción de cuatro pares de mesones π . Como la cámara de burbujas operaba en el campo uniforme de un potente electroimán, los rastros de los mesones π^- se curvan en el sentido de avance del reloj y los rastros de los menos π^+ se curvan en sentido contrario al del avance del reloj. Los mesones π^+ que se desviaron hacia abajo y la izquierda se transforman en mesones μ^+ y un e^+ electrón positivo, como se ve en el diagrama explicativo que acompaña.

Las reacciones de estos sucesos se escriben como sigue:



La fig. 40N es una fotografía en la que un mesón π^- entra en la cámara de burbujas de hidrógeno líquido por la izquier-

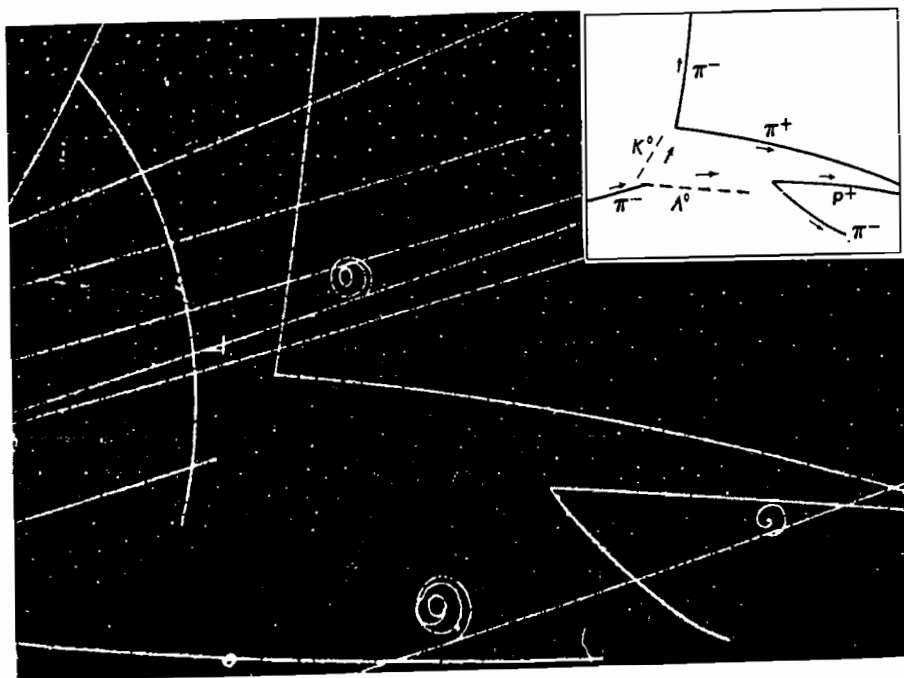


Fig. 40N. Fotografía de cámara de burbujas con rastros de π^- , p , K^0 , Λ^0 , π^+ y π^- , todos en un acontecimiento global. Para la explicación, ver la fig. 40O. (Cortesía de L. Alvarez y colaboradores.)

da. Como se ve en el diagrama explicativo 40O, la interacción con un protón cancela las cargas y corta los rastros al crear dos partículas neutras.

Estas dos partículas que resultan, K^0 y Λ^0 , no producen rastros en la cámara de burbujas; pero, como tienen vida corta, se desintegran rápidamente. La partícula

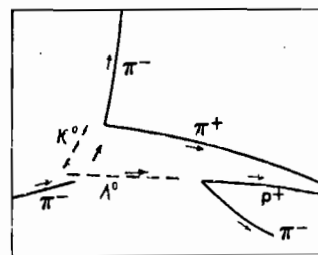
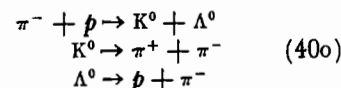


Fig. 40O. Rastros rotulados del suceso ilustrado en la fotografía de cámara de burbujas de la fig. 40N.

neutra K^0 se transforma en un par de piones, π^+ y π^- , mientras que la partícula Λ^0 se transforma en un protón y un π^- , según las reacciones siguientes:



40.14 Paridad. La paridad es un tratamiento matemático de aquello que se describe mejor como una simetría por reflexión en espejo de los fenómenos naturales. Hasta hace poco tiempo se creía que la imagen de espejo de cualquier fenómeno físico, o experimento de laboratorio, es sólo tan real a la naturaleza como lo es la imagen directa en sí misma. Esto se llamaba la conservación de la paridad.

De acuerdo con la conservación de la paridad se creía que si alguien observaba un experimento mirando hacia un espejo y no se le decía que lo que veía era un espejo, no tendría manera de saberlo. Como ejemplo de la tendencia de la Naturaleza hacia la simetría, se encuentran imágenes simétricas en muchos cristales. Con muchos cristales cúbicos, por ejemplo, no hay duda, pues la imagen y la segun-

da proyección de ésta tienen estructuras idénticas, como se ve en la fig. 40P(a).

En la fig. 40P se presentan las dos clases de cristales de cuarzo que se encuentran en la naturaleza. Un cuarzo llamado derecho tiene sus átomos de silicio y oxígeno alineados en una hélice dextrógira alrededor de su eje, mientras que el cuarzo izquierdo (zurdo) es la imagen proyectada del primero y tiene sus moléculas alineadas en sentido opuesto al de las agujas del reloj. Uno hará girar el plano de polari-

cristales de cuarzo

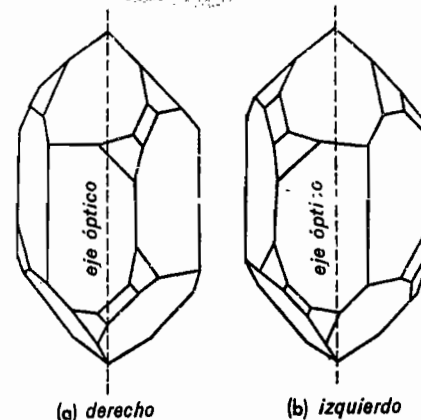


Fig. 40P. Cristales de cuarzo derecho e izquierdo. Cada uno es la imagen de espejo del otro.

zación de luz en el sentido que giran las manecillas del reloj (dextrógiro) cuando avanza a lo largo del eje óptico, mientras que el otro la hará girar en el sentido opuesto. Estos cristales están de acuerdo con el concepto de la conservación de la paridad.

La primera duda sería referente a la conservación de la paridad surgió en la mente de dos jóvenes físicos teóricos, Yang y Lee, cuando en 1956 señalaron que algunos mesones K^+ se transformaban en dos piones mientras otros se convertían en tres. Como prueba fundamental de la paridad se montó un experimento en el National Bureau of Standards bajo la dirección de la señorita C. S. Wu. Este experimento probó que cuando se alineaban núcleos de cobalto-60 radiactivo con sus ejes de giro

paralelos entre sí, se emitían partículas β a lo largo de este eje más abundantes en una dirección que en la otra.

Para comprender la significación de este resultado, considérese la transformación común de un mesón π^+ en un μ^+ y un ν . El π^+ tiene cero spin, mientras que el μ^+ y el ν tienen spin de $\frac{1}{2}$. Para conservar la cantidad de movimiento angular, deben salir separadas las dos partículas girando en direcciones opuestas como se ve encima de la fig. 40Q. Moviéndose en la direc-

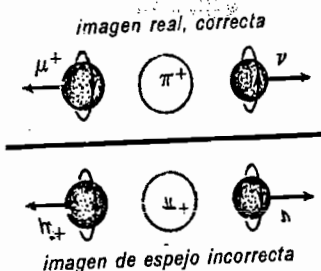


Fig. 40Q. Diagrama esquemático mostrando la helicidad izquierda, o negativa de las partículas μ^+ y ν en la transformación de los mesones π^+ .

ción que señalan las flechas, las dos están girando como avanzan los tornillos a izquierdas. La imagen de espejo de abajo, que aparentemente está prohibida en la naturaleza, muestra a las dos partículas avanzando como tornillos a derechas. Se dice que una partícula que gira avanzando como tornillo a derechas tiene una *helicidad* positiva; cuando avanza se dice que tiene una *helicidad* negativa.

Por la dirección observada de los giros de las partículas β , se sabe ahora que todos los neutrinos, ν , tienen *helicidad* negativa, mientras que los antineutrinos, $\bar{\nu}$, tienen *helicidad* positiva. Con esta regla

y la conservación del giro, vemos en la fig. 40R que en la transformación de π^- , tanto μ^- como $\bar{\nu}$ tienen *helicidad* positiva. Ésta es una propiedad intrínseca del neutrino solamente, ya que se mueve con la velocidad de la luz. Para un observador que se moviera con una velocidad mayor que la del muón, el μ^- parecería girar en la dirección opuesta y tener *helicidad* negativa. Los *muones*, son mesones μ .

Si todas las partículas en la imagen de espejo de la fig. 40Q se cambian a sus correspondientes antipartículas, la interacción resultante viene a ser la interacción real de la fig. 40R. De modo semejante,

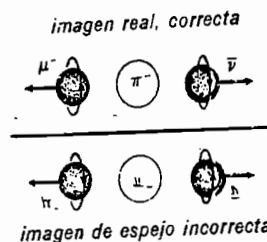


Fig. 40R. Diagrama esquemático mostrando la helicidad positiva o a derechas, de las partículas μ^- y $\bar{\nu}$ en la transformación de los mesones π^- .

si todas las partículas de la imagen reflejada de la fig. 40R se cambian a sus correspondientes antipartículas, obtenemos la interacción real de la fig. 40Q. Por lo tanto, hay una simetría total entre las dos reacciones de transformación.

Si hay un mundo distante formado de antimateria, no hay manera desde aquí, en la Tierra, de poderlo determinar. Más aún, aunque μ^- y μ^+ tienen *helicidad* positiva y negativa respectivamente, no hay información que podamos darle a un hombre de un mundo distante que le pueda decir a él cuál es cuál.

PREGUNTAS Y PROBLEMAS

1. Definir o explicar brevemente cada uno de los siguientes casos: a) sección transversal geométrica; b) sección transversal de dispersión; c) sección transversal de captura, f) sección transversal de fisión.

2. ¿En qué unidades se miden las secciones transversales?

3. a) ¿Cuál es la velocidad media de los neutrones térmicos? b) ¿Cuál es su energía media en voltios?

4. Explicar brevemente el significado de: a) el factor de reproducción; b) pila nuclear, y c) moderador de reactor.

5. a) Escribir el ciclo carbono que se cree produce la energía solar; b) escribir el ciclo protón-protón.

6. ¿Cuántas partículas elementales existen? Hacer una lista de ellas. ¿Cuáles son antipartículas?

7. ¿Cómo se definiría: a) leptón; b) nucleón; c) barión, y d) hiperión?

8. ¿Qué ventajas tiene una cámara de burbujas sobre una cámara de niebla?

9. Encontrar: a) el radio, y b) la sección transversal geométrica de un núcleo de plata-109. (Resp. a) 5.74×10^{-13} cm; b) 1.06 barns.)

10. Encontrar: a) el radio, y b) la sección transversal geométrica del núcleo del telurio-125.

11. Si el factor de reproducción para la fisión de una masa de U-235 es 1.20, ¿cuántos neutrones secundarios se producirán en: a) 5 generaciones; b) 10 generaciones, y c) 100 generaciones? (Nota: usar logaritmos.) (Resp. a) 2.49; b) 6.19; c) 8.28×10^2 .)

12. Si el factor de reproducción para la fisión de una masa de Pu-239 fuera 1.50, ¿cuántos neutrones secundarios se producirían

en: a) 5 generaciones; b) 10 generaciones, y c) 100 generaciones? (Nota: usar logaritmos.)

13. Ya que el tamaño crítico para una explosión de U-235 está entre una canica y una bola de básquetbol, encontrar: a) la relación entre los diámetros de estas dos esferas; b) la relación entre el área de su superficie; c) la relación de sus volúmenes, y d) la relación entre volumen y área. (Resp. a) 12:1; b) 144:1; c) 1728:1; d) 12:1.)

14. Calcular la mínima energía necesaria para producir un par de protones.

15. Si la distancia medida que viaja la partícula K^0 en la fig. 40N es de 2 cm y su rapidez fue muy cercana a la velocidad de la luz, ¿cuál fue la duración de su vida? (Resp. 6.7×10^{-11} seg.)

16. Si la distancia medida que viajaron las partículas λ en la fig. 40N es de 1.5 cm y su rapidez fue cercana a la de la luz, ¿cuál fue la duración de su vida?

17. a) Encontrar la sección transversal total para los neutrones térmicos del Pu-239; b) si 1 cm³ de plutonio contiene 4.7×10^{22} átomos, encontrar la sección transversal macroscópica. (Resp. a) 1 074.6 barns; b) 50.5 cm².)

18. a) Encontrar la sección transversal total para neutrones térmicos de U-235; b) si 1 cm³ de uranio metálico contiene 4.92×10^{22} átomos, encontrar la sección transversal macroscópica.

19. a) Encontrar la sección transversal total para los neutrones térmicos del U-238; b) si 1 cm³ de metal uranio contiene 4.92×10^{22} átomos, encontrar la sección transversal macroscópica. (Resp. a) 11.8 barns; b) 0.58 cm².)

APENDICE I

LISTA DE LOS GANADORES DEL PREMIO NOBEL DE FISICA

- 1901 Röntgen, Wilhelm Conrad (1845-1923), alemán. *Descubrimiento de los rayos X.*
- 1902 Lorentz, Hendrik Antoon (1853-1928), holandés y Zeeman, Pieter (1865-1943), holandés. *Efecto Zeeman.*
- 1903 Becquerel, Henri Antoine (1852-1908), francés. *Descubrimiento de la radiactividad.*
Curie, Pierre (1859-1906), francés, y
Curie, Marie Skłodowska (1867-1934), nacida en Polonia. *Estudios de la radiactividad.*
- 1904 Lord Rayleigh (John William Strutt) (1842-1919) inglés. *Estudio de los gases.*
- 1905 Lenard, Philipp (1852-1947), alemán. *Estudio de los rayos catódicos.*
- 1906 Thomson, Sir Joseph John (1856-1940), inglés. *Descargas a través de gases.*
- 1907 Michelson, Albert A. (1852-1931), norteamericano. *Instrumentos ópticos de precisión.*
- 1908 Lippmann, Gabriel (1845-1921), francés. *Fotografía de colores de interferencia.*
- 1909 Marconi, Guglielmo (1874-1937), italiano, y
Braun, Ferdinand (1850-1918), alemán. *Desarrollo de las comunicaciones inalámbricas.*
- 1910 Van der Waals, Johannes D. (1837-1923), holandés. *Leyes de los gases.*
- 1911 Wien, Wilhelm (1864-1928), alemán. *Leyes de radiación del calor.*
- 1912 Dalén, Gustaf (1869-1937), sueco. *Encendido automático de faros.*
- 1913 Kamerling-Onnes, Heike (1853-1926), holandés. *Helio líquido y bajas temperaturas.*
- 1914 Von Laue, Max (1879-1960), alemán. *Difracción de los rayos X.*
- 1915 Bragg, Sir W. H. (1862-1942), inglés, y su hijo
Bragg, W. L. (1890-), inglés. *Estructura cristalina.*
- 1917 Barkla, Charles G. (1877-1944), inglés. *Rayos X característicos de los elementos.*
- 1918 Planck, Max (1858-1947), alemán. *Teoría cuántica de la radiación.*
- 1919 Stark, Johannes (1874-1957), alemán. *El efecto Stark de las líneas del espectro.*
- 1920 Guillaume, Charles E. (1861-1938), español. *Estudio de las aleaciones de acero al níquel.*
- 1921 Einstein, Albert (1879-1955), alemán. *Teoría de la relatividad y el efecto fotoeléctrico.*
- 1922 Bohr, Niels (1885-1962), danés. *Teoría de la estructura atómica.*
- 1923 Millikan, Robert A. (1868-1953), norteamericano. *Carga del electrón y efecto fotoeléctrico.*
- 1924 Siegbahn, Karl M. (1886-1953), sueco. *Espectroscopia de rayos X.*

- 1925 Franck, James (1882-), alemán, y
Hertz, Gustav (1887-), alemán. *Impacto del electrón sobre los átomos.*
- 1926 Perrin, Jean B. (1870-1942), francés. *Descubrimiento del equilibrio de sedimentación.*
- 1927 Compton, Arthur H. (1892-1962), norteamericano. *Efecto Compton.*
Wilson, Charles T. R. (1869-1959), inglés. *Cámara de niebla de Wilson.*
- 1928 Richardson, Owen Willans (1879-1959), inglés. *Estudio de iones térmicos.*
- 1929 De Broglie, Louis V. (1892-), francés. *Carácter ondulatorio de los electrones.*
- 1930 Raman, Sir Chandrasekhara V. (1888-), hindú. *Efecto Raman.*
- 1932 Heisenberg, Werner (1901-), alemán. *Creación de la Mecánica Cuántica.*
- 1933 Schrödinger, Edwin (1887-1961), alemán, y
Dirac, P. A. M. (1902-), inglés. *Teoría atómica.*
- 1935 Chadwick, James (1891-), inglés. *Descubrimiento del neutrón.*
- 1936 Hess, Victor F. (1883-), austriaco. *Descubrimiento de los rayos cósmicos.*
Anderson, Carl D. (1905-), norteamericano. *Descubrimiento del positrón.*
- 1937 Davisson, Clinton J. (1881-1958), norteamericano y
Thompson, George P. (1892-), inglés. *Difracción de electrones por cristales.*
- 1938 Fermi, Enrico (1901-1954), italiano. *Reacciones de neutrones lentos.*
- 1939 Lawrence, Ernest O. (1901-1958), norteamericano. *Desarrollo del ciclotrón.*
- 1940, 1941, 1942. No se confino.
- 1943 Stern, O. (1888-), alemán. *Momento magnético del protón.*
- 1944 Rabi, I. I. (1898-), norteamericano. *Momentos magnéticos del núcleo.*
- 1945 Pauli, W. (1900-1958), alemán. *Principio de Pauli de la exclusión.*
- 1946 Bridgman, P. W. (1882-1961), norteamericano. *Efectos físicos de las altas presiones.*
- 1947 Appleton, Sir E. V. (1892-), inglés. *Exploración de la ionosfera.*
- 1948 Blackett, P. M. S. (1897-), inglés. *Descubrimiento sobre radiación cósmica.*
- 1949 Yukawa, H. (1907-), japonés. *Predicción teórica de los mesones.*
- 1950 Powell, C. F. (1903-), inglés. *Estudios fotográficos de los rayos cósmicos.*
- 1951 Cockcroft, Sir J. D. (1897-), inglés, y
Walton, E. T. S. (1903-), inglés. *Primera transmutación de núcleos atómicos.*
- 1952 Bloch, Felix (1905-), norteamericano, y
Purcell, Ed. M. (1912-), norteamericano. *Momentos magnéticos nucleares.*
- 1953 Zernike, Fritz (1888-), holandés. *Microscopio de contraste de fase.*
- 1954 Born, Max (1882-), alemán. *Mecánica cuántica y funciones de onda.*
Bother, Walter (1891-1957), alemán. *Método de coincidencias en el estudio rayos cósmicos.*
- 1955 Kusch, P. (1911-), norteamericano, y
Lamb, W. E. (1913-), norteamericano. *Espectroscopia de microonda y estructura atómica.*
- 1956 Shockley, W. (1910-), norteamericano;
Brattain, W. H. (1902-), norteamericano, y
Bardeen, J. (1908-), norteamericano. *Semiconductores y su aplicación a transistores.*
- 1957 Yang, C. N. (1922-), chino, y
Lee, T. D. (1926-), chino. *Estudios del concepto de paridad en Física Moderna.*

- 1958 Cerenkov, P. A. (1904-), ruso;
Tamm, I. E. (1895-), ruso, y
Frank, I. M. (1908-), ruso. *Descubrimiento y estudio de la radiación Cerenkov.*
- 1959 Segre, E. (1905-), norteamericano, y
Chamberlain, O. (1920-), norteamericano. *Descubrimiento del antiprotón.*
- 1960 Glaser, D. A. (1926-), norteamericano. *La cámara de burbujas.*
- 1961 Hofstadter, Robt. (1916-), norteamericano, y
Mossbauer, R. L. (1930-), alemán. *Radiación y absorción nuclear.*
- 1962 Landau, L. D. (1908-), ruso. *Explicación matemática de los fenómenos de temperatura muy baja.*

APENDICE II

EL ALFABETO GRIEGO

A	α	Alfa	H	η	Eta	N	ν	Nu	T	τ	Tau
B	β	Beta	Θ	θ	Theta	Ξ	ξ	Csi	T	υ	Ipsilon
Γ	γ	Gamma	I	ι	Iota	O	\omicron	Omicron	Φ	ϕ	Fi
Δ	δ	Delta	K	κ	Kappa	Π	π	Pi	X	χ	Xi
E	ϵ	Epsilon	Λ	λ	Lambda	P	ρ	Rho	Ψ	ψ	Psi
Z	ζ	Zeta	M	μ	Mu	Σ	σ	Sigma	Ω	ω	Omega

APENDICE III

LISTA COMPLETA DE LOS ISOTOPOS ESTABLES
DE LOS ELEMENTOS QUIMICOS

No. At.	Elemento	Símb.	Isótopos, No. de masa	P. At.
1	hidrógeno	H	1, (2)	1.0078
2	helio	He	4, (3)	4.002
3	litio	Li	6, 7	6.940
4	berilio	Be	9	9.02
5	boro	B	10, 11	10.82
6	carbono	C	12, (13)	12.01
7	nitrógeno	N	14, (15)	14.008
8	oxígeno	O	16, (18), (17)	16.000
9	flúor	F	19	19.000
10	neón	Ne	20, (21), 22	20.183
11	sodio	Na	23	22.997
12	magnesio	Mg	24, 25, 26	24.32
13	aluminio	Al	27	26.97
14	silicio	Si	28, 29, 30	28.06
15	fósforo	P	31	31.02
16	azufre	S	32, 33, 34	32.06
17	cloro	Cl	35, 37	35.457
18	argón	A	(36), (38), 40	39.944
19	potasio	K	39, (40), 41	39.096
20	calcio	Ca	40, (42), (43), 44	40.08
21	escandio	Sc	45	45.10
22	titanio	Ti	46, 47, 48, 49, 50	47.90
23	vanadio	V	51	50.95
24	cromo	Cr	50, 52, 53, 54	52.01
25	manganeso	Mn	55	54.93
26	hierro	Fe	54, 56, 57, (58)	55.84
27	cobalto	Co	59	58.94
28	níquel	Ni	58, 60, 61, 62, (64)	58.69
29	cobre	Cu	63, 65	63.57
30	cinc	Zn	64, 66, 67, 68, (70)	65.38
31	galio	Ga	69, 71	69.72
32	germanio	Ge	70, 72, 73, 74, 76	72.60
33	arsénico	As	75	74.91
34	selenio	Se	(74), 76, 77, 78, 80, 82	78.96
35	bromo	Br	79, 81	79.916
36	criptón	Kr	(78), 80, 82, 83, 84, 86	83.7
37	rubidio	Rb	85, 87	85.48
38	estroncio	Sr	(84), 86, 87, 88	87.63

No. At.	Elemento	Símb.	Isótopos, No. de masa	P. At.
39	itrio	Yt	89	88.92
40	circonio	Zr	90, 91, 92, 94, 96	91.22
41	columbio	Cb	93	92.91
42	molibdeno	Mo	92, 94, 95, 96, 97, 98, 100, 102	96.0
43	tecnecio	Tc	99	97.8
44	rutenio	Ru	96, 98, 99, 100, 101, 102, 104	101.7
45	rodio	Rh	103	102.91
46	paladio	Pd	(102), 104, 105, 106, 108, 110	106.7
47	plata	Ag	107, 109	107.88
48	cadmio	Cd	106, (108), 110, 111, 112, 113, 114, 116	112.41
49	indio	In	113, 115	114.76
50	estaño	Sn	112, (114), (115), 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124	118.70
51	antimonio	Sb	121, 123	121.76
52	tellurio	Te	(120), 122, 123, 124, 125, 126, 128, 130	127.61
53	yodo	I	127	126.92
54	xenón	Xe	(124), (126), 128, 129, 130, 131, 132, 134, 136	131.3
55	cesio	Cs	133	132.91
56	bario	Ba	(130), (132), 134, 135, 136, 137, 138	137.36
57	lantano	La	139	138.92
58	cerio	Ce	(136), (138), 140, 142	140.13
59	praseodimio	Pr	141	140.92
60	neodimio	Nd	142, 143, 144, 145, 146, (148), (150)	144.27
61	prometeo	Pm	(150)	146.0?
62	samario	Sm	144, 147, 148, 149, 150, 152, 154	150.43
63	europio	Eu	151, 153	152.0
64	gadolinio	Gd	155, 156, 157, 158, 160	156.9
65	terbio	Tb	159	159.2
66	disprosio	Dy	161, 162, 163, 164	162.46
67	holmio	Ho	165	163.5
68	erbio	Er	166, 167, 168, 170	167.64
69	tulio	Tm	169	169.4
70	iterbio	Yb	171, 172, 173, 174, 176	173.04
71	lutecio	Lu	175	175.0
72	hafnio	Hf	176, 177, 178, 179, 180	178.6
73	tantalio	Ta	181	180.88
74	wolframio	W	182, 183, 184, 186	184.0
75	renio	Re	185, 187	186.31
76	osmio	Os	186, (187), 188, 189, 190, 192	191.5
77	iridio	Ir	191, 193	193.1
78	platino	Pt	(192), 194, 195, 196, 198	195.23
79	oro	Au	197	197.2
80	mercurio	Hg	(196), 198, 199, 200, 201, 202, 204	200.61

81	talio	Tl	210 RaC'' β	203	205	207 AcC'' β	208 ThC'' β	209
82	plomo	Pb	214 RaB β	210 RaD β	206	211 AcB β	207 ThB β	208 ThC β
83	bismuto	Bi	214 RaC β	210 RaE β	206	211 AcC β	207 ThC β	208 ThC' β
84	polonio	Po	218 RaA α	214 RaC' α	210 Pc α	215 AcA α	211 AcC' α	215 ThA α
85	astatino	At	α	α	α	α	α	217
86	radón	Rn	222 Rn α	219 An α	220 Tn α	221	222	223
87	francio	Fa	α	α	α	α	α	221
88	radio	Ra	226 Rz α	223 AcX α	223 MsI β	224 ThX α	225 α	226
89	actinio	Ac	α	227 Ac β	228 MsII β	229 Th α	230 RaTh α	231
90	torio	Th	230 Io α	234 UX ₁ α	231 UY α	232 Th α	233 RaTh α	234
91	protactinio	Pa	234 UX ₂ α	231 Pa α	232 Th α	233 RaTh α	234	235
92	uranio	U	234 UII α	238 U α	235 AcU α	236 Np α	237 Pu α	238
93	neptunio	Np	α	α	α	α	α	239
94	plutonio	Pu	238 α	236 α	239 α	240 α	241 α	242
95	americio	Am	α	α	α	α	α	243
96	curio	Cm	242 α	240 α	243 α	244 α	245 α	246
97	berkelio	Bk	243 α	241 α	244 α	245 α	246 α	247
98	californio	Cf	244 α	242 α	243 α	244 α	245 α	246
99	einsteinio	E	254 α	252 α	253 α	254 α	255 α	256
100	fermio	Fm	255 α	253 α	254 α	255 α	256 α	257
101	mendelevio	Mv	256 α	254 α	255 α	256 α	257 α	258
102	nobelio	No	257 α	255 α	256 α	257 α	258 α	259
103	lawrencio	Lw	258 α	256 α	257 α	258 α	259 α	260

APENDICE IV

TABLA DE MASAS ATOMICAS DE LOS ISOTOPOS DE LOS ELEMENTOS LIGEROS

s = segundos m = minutos h = horas d = días a = años

Símb. del isótopo	Abundancia relativa y período de vida media	Masa atómica	Símb. del isótopo	Abundancia relativa y período de vida media	Masa atómica
${}^1_0\text{H}^1$	β^- 10 ⁻⁶ s	1.00898	${}^{17}_9\text{F}^{17}$	β^+ 70s	17.00749
${}^1_0\text{H}^2$	99.98	1.00814	${}^{18}_9\text{F}^{18}$	β^+ 112m	18.00667
${}^1_0\text{H}^3$	β^- 31a	3.01700	${}^{19}_9\text{F}^{19}$	100	19.00446
${}^2_0\text{He}^3$		3.01698	${}^{20}_9\text{F}^{20}$	β^- 12s	20.00635
${}^2_0\text{He}^4$	100	4.00387	${}^{19}_{10}\text{Ne}^{19}$	β^+	19.00792
${}^2_0\text{He}^6$	β^- 0.8s	6.02047	${}^{20}_{10}\text{Ne}^{20}$	90	19.99886
${}^3_3\text{Li}^6$	7.5	6.01702	${}^{21}_{10}\text{Ne}^{21}$	0.27	21.00059
${}^3_3\text{Li}^7$	92.5	7.01822	${}^{22}_{10}\text{Ne}^{22}$	9.73	21.99827
${}^3_3\text{Li}^8$	β^- 0.88s	8.02502	${}^{23}_{10}\text{Ne}^{23}$	β^- 43s	23.00168
${}^4_4\text{Be}^7$	K, γ 43d	7.01915	${}^{21}_{11}\text{Na}^{21}$	β^+ 23s	.....
${}^4_4\text{Be}^9$	2 α	8.00785	${}^{22}_{11}\text{Na}^{22}$	β^+, γ 3a	22.00132
${}^4_4\text{Be}^{10}$	100	9.01504	${}^{23}_{11}\text{Na}^{23}$	100	22.99714
${}^4_4\text{Be}^{10}$	β^-, γ 10 ³ a	10.01671	${}^{24}_{11}\text{Na}^{24}$	β^-, γ 14.8h	23.99865
${}^5_{10}\text{B}^{10}$	18.4	10.01611	${}^{25}_{11}\text{Na}^{25}$	β^-, γ 62s	24.99779
${}^5_{10}\text{B}^{11}$	81.6	11.01279	${}^{23}_{12}\text{Mg}^{23}$	β^+ 11.6s	23.00111
${}^5_{10}\text{B}^{12}$	β^- 0.02s	12.01816	${}^{24}_{12}\text{Mg}^{24}$	77.4	23.99270
${}^6_{12}\text{C}^{10}$	β^+ 8.8s	10.02060	${}^{25}_{12}\text{Mg}^{25}$	11.5	24.99381
${}^6_{12}\text{C}^{11}$	β^+ 20m	11.01492	${}^{26}_{12}\text{Mg}^{26}$	11.1	25.99087
${}^6_{12}\text{C}^{12}$	98.9	12.00380	${}^{27}_{12}\text{Mg}^{27}$	β^-, γ 10.2m	26.99295
${}^6_{12}\text{C}^{13}$	1.1	13.00747	${}^{27}_{13}\text{Al}^{27}$	β^+ 7s	25.99619
${}^6_{12}\text{C}^{14}$	β^- 10 ³ a	14.00768	${}^{28}_{13}\text{Al}^{28}$	100	26.99014
${}^7_{14}\text{N}^{13}$	β^+, γ 9.9m	13.00986	${}^{29}_{13}\text{Al}^{29}$	β^-, γ 2.4m	27.99083
${}^7_{14}\text{N}^{14}$	99.62	14.00751	${}^{30}_{13}\text{Al}^{30}$	β^- 6.7m	28.98975
${}^7_{14}\text{N}^{15}$	0.38	15.00486	${}^{27}_{14}\text{Si}^{27}$	β^+ 4.9s	26.99525
${}^7_{14}\text{N}^{16}$	β^- 8s	16.01074	${}^{28}_{14}\text{Si}^{28}$	89.6	27.98584
${}^8_{16}\text{O}^{15}$	β^+ 126s	15.00777	${}^{29}_{14}\text{Si}^{29}$	6.2	28.98572
${}^8_{16}\text{O}^{16}$	99.76	16.00000	${}^{30}_{14}\text{Si}^{30}$	4.2	29.98331
${}^8_{16}\text{O}^{17}$	0.04	17.00453	${}^{31}_{14}\text{Si}^{31}$	β^- 170m	30.98521
${}^8_{16}\text{O}^{18}$	0.20	18.00487	${}^{29}_{15}\text{P}^{29}$	β^+ 4.6s	28.98962
${}^8_{16}\text{O}^{19}$	β^- 31s	19.00948	${}^{30}_{15}\text{P}^{30}$	β^+ 2.5m	29.98817
			${}^{31}_{15}\text{P}^{31}$	100	30.98362
			${}^{32}_{15}\text{P}^{32}$	β^- 14.3d	31.98409

Símb. del isótopo	Abundancia relativa y período de vida media	Masa atómica	Símb. del isótopo	Abundancia relativa y período de vida media	Masa atómica
$^{16}\text{S}^{31}$	β^+ 3.2s	30.98886	$^{82}\text{Pb}^{208}$		208.04140
$^{16}\text{S}^{32}$	95.1	31.98226	$^{83}\text{Bi}^{209}$		209.04550
$^{16}\text{S}^{33}$	0.74	32.98196	$^{84}\text{Po}^{218}$		218.07676
$^{16}\text{S}^{34}$	4.2	33.97877	$^{86}\text{Rn}^{222}$		222.08663
$^{16}\text{S}^{35}$	β^- 87d	34.98035	$^{88}\text{Ra}^{226}$		226.09574
$^{16}\text{S}^{36}$	0.016	.....	$^{90}\text{Th}^{232}$		232.11034
$^{17}\text{Cl}^{33}$	β^+ 2.4s	.....	$^{92}\text{U}^{234}$		234.11379
$^{17}\text{Cl}^{34}$	β^+ 33m	33.98100	$^{92}\text{U}^{235}$		235.11704
$^{17}\text{Cl}^{35}$	75.4	34.98018	$^{92}\text{U}^{238}$		238.12869
$^{17}\text{Cl}^{36}$	β^+ , K, β^-	35.97996	$^{93}\text{Np}^{237}$		237.12158
$^{18}\text{A}^{35}$	β^+ 1.9s	.....	$^{94}\text{Pu}^{239}$		239.12653
$^{18}\text{A}^{36}$	0.31	35.97893	$^{98}\text{Cf}^{244}$		244.14211
$^{18}\text{A}^{37}$	0.06	36.97850			
$^{18}\text{A}^{38}$	β^- 4m	37.97488			
$^{18}\text{A}^{39}$	91.63	39.97510			
$^{18}\text{A}^{40}$	β^- , γ 110m	40.97776			

APENDICE V

VALORES DE LAS CONSTANTES FISICAS GENERALES
(SEGUN DU MOND)

Carga del electrón	$e = 1.6019 \times 10^{-19}$ culombios
Carga del electrón	$e = 4.8022 \times 10^{-10}$ u.e.e. de c.
Carga específica del electrón	$e/m = 1.7589 \times 10^{11}$ culombio/kg
Carga específica del protón	$e/M_p = 9.5795 \times 10^7$ culombio/kg
Masa del electrón	$m = 9.1072 \times 10^{-31}$ kg
Constante de acción de Planck	$h = 6.6238 \times 10^{-34}$ julio seg
Unidad de cantidad de movimiento angular	$h/2\pi = 1.0542 \times 10^{-34}$ julio seg
Masa del átomo de peso atómico unidad	$M = 1.6600 \times 10^{-27}$ kg
Masa del protón	$M_p = 1.6722 \times 10^{-27}$ kg
Relación entre masa del protón y del electrón	$M_p/m = 1836.1$
Constante de la ley del desplazamiento de Wien	$C = 0.28976$ cm grado
Velocidad de la luz	$c = 299\,790$ km/seg
Cuadrado de la velocidad de la luz	$c^2 = 8.9874 \times 10^{10}$ km ² /seg ²

APENDICE VI

TABLA PERIODICA DE LOS ELEMENTOS QUIMICOS

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	
1 H 1.0078	4 Be 9.02	5 B 10.82	6 C 12.01	7 N 14.008	8 O 16.000	9 F 19.000	10 Ne 20.183	
11 Li 6.940	12 Be 9.02	13 B 10.82	14 C 12.01	15 N 14.008	16 O 16.000	17 F 19.000	18 Ne 20.183	
19 K 39.096	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.01	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.94
37 Rb 85.46	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 99	44 Ru 101.1	45 Rh 102.91
55 Cs 132.9	56 Ba 137.4	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 145	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0
79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209	84 Po 210	85 At 210	86 Rn 222	87 Fr 223
87 Fr 223	88 Ra 226	89 Ac 227	90 Th 232	91 Pa 231	92 U 238	93 Np 237	94 Pu 242	95 Am 243
101 Md 258	102 No 259	103 Lr 260	104 Rf 261	105 Db 262	106 Sg 266	107 Bh 264	108 Hs 277	109 Mt 268

APENDICE VII

SISTEMA ABREVIADO DE LOS NUMEROS

Al hablar del tamaño o la forma de un objeto o del intervalo de tiempo transcurrido entre dos acontecimientos, es conveniente expresar los números muy grandes, y los decimales muy pequeños en una forma abreviada. Esto se hace principalmente para ahorrar tiempo y espacio. Es conveniente para el astrónomo que estudia las estrellas, por un lado, y para el físico y el químico que estudian los átomos, por el otro. Las abreviaturas de uso común basadas en las potencias de 10, son las siguientes:

10 = 10 ¹	1 = 10 ⁰
100 = 10 ²	0.1 = 10 ⁻¹
1,000 = 10 ³	0.01 = 10 ⁻²
10,000 = 10 ⁴	0.001 = 10 ⁻³
100,000 = 10 ⁵	0.0001 = 10 ⁻⁴
1,000,000 = 10 ⁶	0.00001 = 10 ⁻⁵

La forma abreviada del segundo miembro de cada ecuación es matemáticamente correcta. Por ejemplo,

$$10^3 = 10 \times 10 \times 10 = 1\,000$$

y

$$10^{-3} = \frac{1}{10^3} = \frac{1}{1\,000} = 0.001$$

En cada caso se ve que el exponente da directamente el número de dígitos que se mueve el punto a partir de las unidades, especificando los números positivos, el número de lugares que se corre dicho punto hacia la derecha para formar los números grandes, mientras que los exponentes negativos indican el número de lugares que se traslada hacia la izquierda para dar las fracciones pequeñas. Para ilustrar el uso de este sistema, supongamos que decimos que una piedra pesa tres millones de kilogramos. Puede escribirse

$$3\,000\,000\text{ kg} = 3 \times 1\,000\,000\text{ kg} = 3 \times 10^6\text{ kg}$$

En la forma abreviada la masa se escribe así, 3×10^6 kg. Si hay varias cifras distintas de cero, se pueden usar diferentes abreviaturas. Por ejemplo, en el caso de números grandes,

$$840\,000\,000 = 84 \times 10\,000\,000 = 84 \times 10^7$$

o bien,

$$\bullet \quad 840\,000\,000 = 8.4 \times 100\,000\,000 = 8.4 \times 10^8$$

En el caso de números pequeños, por otra parte,

$$0.0024 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ ó } 24 \times 10^{-4}$$

APÉNDICES

Para ilustrar las ventajas de esta forma abreviada, damos la masa de la Tierra y la masa de un *electrón* que se han encontrado experimentalmente:

masa de la Tierra, $m = 5.97 \times 10^{24} \text{ kg}$
masa de un electrón, $m = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Si se escribieran estas cantidades en la forma decimal completa, resultarían como sigue:

masa de la Tierra = 5 970 000 000 000 000 000 000 kg
masa del electrón = 0.000 000 000 000 000 000 000 911 kg

La multiplicación y la división de números grandes y pequeños en la forma abreviada, se reduce a la suma o resta de los exponentes.

Regla 1. Cuando se cambia una potencia, del numerador al denominador, o viceversa, se cambia el signo del exponente. Por ejemplo,

$$\frac{5}{2 \times 10^{-6}} = \frac{5 \times 10^6}{2}$$

Regla 2. Cuando se multiplican dos potencias, se suman sus exponentes. Por ejemplo,

$$3 \times 10^5 \times 2 \times 10^4 = 3 \times 2 \times 10^{5+4} = 6 \times 10^9$$

También

$$3 \times 10^{17} \times 2 \times 10^{-12} = 3 \times 2 \times 10^{17-12} = 6 \times 10^5$$

Regla 3. Cuando se dividen dos potencias, se restan sus exponentes. Por ejemplo,

$$\frac{8 \times 10^6}{2 \times 10^4} = \frac{8 \times 10^{6-4}}{2} = 4 \times 10^5$$

También

$$\frac{6 \times 10^{-7}}{3 \times 10^{-2}} = \frac{6 \times 10^{-7+2}}{3} = 2 \times 10^5$$

APENDICE VIII

LA REGLA DE CALCULO

Una regla de cálculo es un instrumento mecánico simple para realizar las operaciones aritméticas de *multiplicación* y *división*. Ya que las reglas de cálculo son fáciles de usar y aun las más baratas son adecuadas para la mayoría de usos, todo estudiante de física debe adquirir una y aprender a usarla.

El principiante debe escoger una regla recta y barata de unos veinticinco centímetros de larga que contenga de cuatro a seis escalas. Las más comúnmente usadas son las escalas *A*, *B*, *C* y *D* que se ven en la fig. A. Nótese que consiste en el *cuerpo* de la regla de cálculo y dos partes móviles que llamaremos la *reglilla* y el *cursor*.

Cifras significativas. Antes de aprender el uso de la regla de cálculo debemos comprender claramente el significado del término *cifras significativas*. Las tres listas de números dados abajo en columna, ayudarán a ilustrar su significado.

La primera cifra significativa de un número es el primer dígito que no es cero. La última cifra significativa es el último dígito que no es cero.

La mayoría de las reglas de cálculo sólo pueden manejar la multiplicación y división de tres cifras significativas. Más aún, las respuestas sólo son correctas hasta tres cifras significativas.

A	B	C
Dos cifras significativas	Tres cifras significativas	Cuatro cifras significativas
24	374	5279
6.9	21.5	63.08
0.37	6.05	0.1062
0.053	0.00328	0.04503
4600	546000	692700

Si se van a usar números como los de la columna *C* en cualquier regla de cálculo, se deben reducir a tres cifras significativas. Estos números, en particular, se considerarían, por lo tanto, con los valores de 5280, 63.1, 0.106, 0.00450 y 693 000, respectivamente. Ya que muchas de las mediciones hechas en los laboratorios científicos son exactas sólo a la tercera cifra significativa, generalmente es suficiente y justificado el uso de la regla de cálculo, aunque no siempre.

Las escalas *C* y *D*. Al hacer el primer examen crítico de su regla, note que hay cuatro escalas fundamentales, y que están marcadas a la izquierda de la regla con las letras *A*, *B*, *C* y *D*. (Ver la fig. A.) Como la multiplicación y la división se realizan comúnmente con las dos escalas idénticas *C* y *D*,

examinemos toda la longitud de estas escalas en tres secciones y veremos cómo determinar la posición del retículo del cursor.

Considérese la sección izquierda de las escalas *C* y *D* desde el índice izquierdo 1 hasta el número principal 2, como se muestra en la fig. B. Nótese que el intervalo está dividido en diez divisiones, que representan décimos, y cada uno de éstos en diez subdivisiones que representan centésimos.

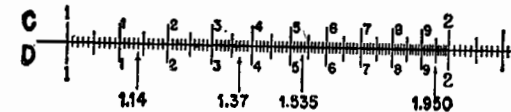


Fig. B.

Si el retículo del cursor se encontrara en la posición señalada por la flecha de la izquierda, se leería su posición como 1.14. De modo semejante, la posición de la segunda flecha representa la lectura 1.37. La posición de la tercera flecha aparece entre 1.53 y 1.54; por lo cual hacemos lo que se llama una *interpolación* y escribimos 1.535. La interpolación es el proceso de insertar o encontrar valores intermedios haciendo una estimación razonable del valor buscado. Ya que la interpolación es sólo una buena estimación, la lectura 1.535 apenas es mejor que lo indicado con tres cifras significativas. Aplicando el proceso de interpolación a la posición de la cuarta flecha, podríamos escribir 1.950, entendiendo que el último cero puede no ser correcto.

Aunque se ha incluido un punto decimal después del primer dígito en cada posición de las flechas de la fig. B, podría haberse puesto igualmente antes del primer dígito, o después del segundo o del tercero, etc. En otras palabras el índice 1 izquierdo puede representar cualquiera de los números 1, 10, 100 y 1 000, etc. Si dejamos que este índice represente 10, el número 2 de la derecha representa 20 y las posiciones de las flechas se leerían como 11.4, 13.7, 15.35, y 19.50. Si hacemos que el índice represente 100, el dos de la derecha representará 200 y las posiciones de las flechas se leerían como 114, 137, 153.5 y 195.0.

Colóquese la reglilla donde quiera entre los números principales 1 y 2 y practique la lectura de su posición hasta sentirse seguro de que está leyéndola correctamente.

Estamos listos ahora para examinar la sección del centro de las escalas *C* y *D* entre los números 2, 3 y 4. Nótese, en la fig. C y en su propia regla, que cada uno de estos intervalos están divididos en décimos y cada subdivisión en quintos. En otras palabras, los intervalos menores marcados representan

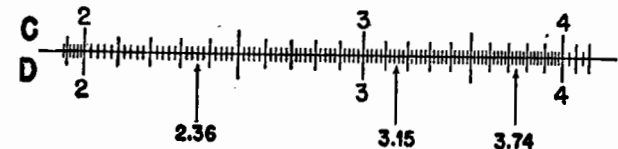


Fig. C.

2/10 de una subdivisión. Supongamos que deseamos encontrar la posición 2.36 en estas escalas. La primera cifra significativa indica que esta posición queda entre 2 y 3. Póngase el retículo de la regla en el 2. La segunda cifra significativa, 3, indica que la posición está entre la tercera y cuarta subdivisiones y la tercera cifra, 6, dice que está a 6/10 ó 3/5 de la distancia que hay entre

estas subdivisiones. Por lo tanto, la flecha de la izquierda está colocada correctamente en 2.36.

Como los números 3, 4 y 5 pueden representar a los números 30, 40 y 50 ó 300, 400 y 500, la posición de las flechas puede representar 23.6, 31.5 y 37.4 ó 236, 315 y 374, respectivamente.

Por último, podemos examinar la sección derecha de las escalas *C* y *D* entre los números 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 1. (Ver la fig. D.) Entre cada par de números hay diez subdivisiones y cada subdivisión está dividida en mitades o 5/10. Nótese cuidadosamente las posiciones de las flechas y asegúrese de que se puede leer cualquier posición del cursor cuando está en cualquier lugar de las escalas *C* y *D*.

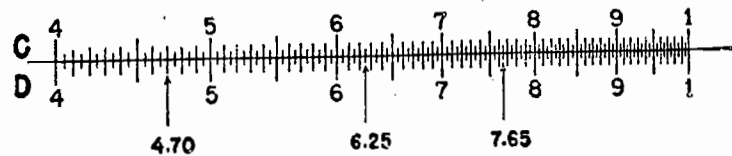


Fig. D.

Multiplicación. Para multiplicar dos factores, efectúense los cuatro pasos siguientes: 1) colocar el retículo del cursor en el primero de sus números sobre la escala *D*; 2) mover la reglilla hasta que su índice 1 de la izquierda de la escala *C* esté exactamente bajo el retículo; 3) mover el retículo del cursor hasta su segundo número en la escala *C*; 4) leer la respuesta en la escala *D* con el retículo.

Supongamos, por ejemplo, que se desea encontrar el producto 3×2 . Aunque no se necesita de la regla de cálculo para encontrar la respuesta, la ejecución de esta operación tan simple aclarará el método (Ver la fig. E.) 1) Poner el retículo del cursor en 3 de la escala *D*; 2) mover la reglilla y llevar su índice izquierdo de la escala *C* hasta el retículo; 3) mover el cursor al segundo número 2 de la escala *C*; 4) leer la respuesta como 6 en la escala *D*.

Un poco de estudio muestra que la colocación de la regla para los productos 30×20 , 3×20 , 30×2 , 300×20 , etc., es la misma señalada antes.



Fig. E.

El número 6 es el primer dígito correcto para todas estas respuestas; pero necesita determinarse por inspección el número de ceros que se han de agregar.

Considérese el procedimiento para obtener el producto de 24.0×1.5 . 1) Poner el retículo exactamente en la línea de la cuarta subdivisión después del 2 de la escala *D*. Esta posición representa 24.0. 2) Mover el índice izquierdo 1 de la escala *C* hasta el retículo. 3) Mover el cursor a la quinta subdivisión entre 1 y 2 de la escala *C*. 4) La respuesta está en la escala *D*, bajo el cursor, y se encuentra exactamente en la sexta subdivisión después del 3, o sea, 360. Para situar el punto decimal, estúdiense los dos números

originales. Una y media veces 24 no puede ser tan pequeño como 3.60 ni tan grande como 360. Por tanto, debe ser 36.0. De modo semejante el producto 24.0×2 es 48.0 como señala la posición del retículo a la derecha de la fig. F.

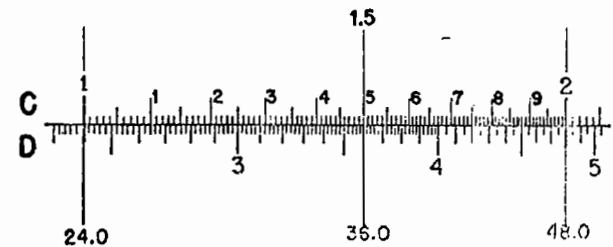


Fig. F.

Encontrar el producto 3.8×56.5 . Cuando se realizan los pasos anteriores para buscar este producto, se encontrará que la respuesta está a la derecha del final de la escala *D*. En estos casos se mueve el índice 1 de la derecha de la escala *C* al primer número 3.8 de la escala *D*. (Ver la fig. G.) Moviendo el cursor hacia la izquierda, hasta que su retículo quede en el segundo número 56.5 de la escala *C*, la respuesta se lee en la escala *D* como 215.



Fig. G.

El punto decimal. Para encontrar el punto decimal en cualquier problema, sustituya por números redondeados por los datos del problema y determine la posición del punto decimal por aproximación. Por ejemplo, en el último problema se redondea el número 3.8 a 4 y el 56.5 a 60. El producto 4×60 es 240, así que la respuesta es 215 y no 21.5 ni 2150.

División. La división en la regla de cálculo es justamente lo inverso de la multiplicación.

Regla. Para dividir un número entre otro, efectúense los siguientes pasos: 1) Poner el retículo del cursor en el dividendo, o numerador, en la escala *D*. 2) Mover la reglilla hasta que el divisor, o denominador, en la escala *C* se alinee con el retículo. 3) El cociente, o respuesta está debajo del índice de *C* en un extremo de la reglilla o en el otro. En pocas palabras, alinear el numerador en la escala *D* con el denominador en la escala *C* y la respuesta queda bajo el índice de la escala *C*.

Por ejemplo, encontrar el cociente $6/2$. 1) Poner el retículo en 6 de la escala *D*. (Ver la fig. E.) 2) Llevar el 2 de la escala *C* hasta el retículo.

3) La respuesta, 2, está ahora bajo el índice de *C* en la escala *D*. Nótese que la fracción $6/2$ está de cabeza en la regla.

Como un segundo ejemplo, encontrar el cociente de $215/56.5$. (Ver la fig. G.) Poner el retículo en 215 de la escala *D* y luego alinear el 56.5 de la escala *C* con el anterior. La respuesta, 3.8, está en la escala *D* con el índice de *C* de la derecha. Nótese de nuevo que la fracción está agrupada, pero invertida en la posición del retículo.

Para encontrar el punto decimal en el último problema, redondear los números y usar aritmética mental. Para el número 215 escribir 200 y para 3.8 escribir 4. El cociente de $200/4$ es 50. Por tanto, la respuesta es 56.5 y no 5.65 ni 565.

Cuadrados y raíces cuadradas. Para encontrar el cuadrado de un número se multiplica ese número por sí mismo. Para encontrar la raíz cuadrada de un número se requiere realizar un proceso aritmético complicado. Con la regla de cálculo son relativamente simples estas operaciones.

Para encontrar el cuadrado de un número, usar las siguientes reglas:
1) Poner el retículo del cursor en el número en la escala *D*. 2) Leer la respuesta bajo el retículo en la escala *A*.

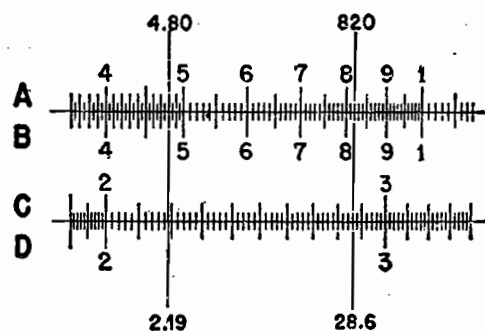


Fig. H.

La inspección de la fig. A muestra que directamente encima del 2 de la escala *D* encontramos su cuadrado, 4, en la escala *A*. Directamente encima del 3 de la escala *D* está su cuadrado, 9, en la escala *A*.

Para encontrar la raíz cuadrada de un número se usa el proceso inverso:
1) Poner el retículo en el número de la escala *A*. 2) Leer la raíz cuadrada en la escala *D* bajo el cursor. Siempre se usa la mitad izquierda de la escala *A* para números con número de cifras non delante del punto decimal y la mitad de la derecha para aquéllos con número de cifras par delante del punto decimal.

En la fig. H, las posiciones del retículo se colocaron para obtener las raíces cuadradas de 4.80 y 820. Las dos respuestas están en la escala *D* y son 2.19 y 28.6.

SUMARIO

La regla de cálculo es usada muy frecuente y muy convenientemente para la multiplicación, la división, obtener cuadrados y raíces cuadradas. Una regla de veinticinco centímetros es capaz de dar una aproximación hasta de tres cifras significativas. La primera cifra significativa del número es el primer dígito que no es cero. La última cifra significativa es el último dígito que no es cero.

PREGUNTAS

1. ¿Cuáles son las dos escalas de la regla de cálculo que deben usarse para: a) la multiplicación, y b) la división?
2. ¿Cuáles son las dos escalas de la regla de cálculo que deben usarse para encontrar: a) los cuadrados, y b) las raíces cuadradas de los números?
3. ¿En cuántas cifras significativas puede confiarse en los cálculos de la regla de cálculo?
4. Nombrar las tres partes principales de la regla de cálculo.
5. ¿Por qué ha de ser más exacta una regla de cálculo más larga?
6. ¿Qué extremo de la regla de cálculo tiene mayor exactitud en lo que se refiere a: a) cifras significativas, y b) porcentaje de error? (Nota: ¿Puede interpolarse con más exactitud entre 98 y 99 que entre 101 y 102?)

PROBLEMAS

1. Expresar cada uno de los siguientes números con tres cifras significativas solamente: a) 6497; b) 38.27; c) 0.43927; d) 0.06008; e) 349.8.
2. Expresar cada uno de los números siguientes con sólo tres cifras significativas: a) 2359; b) 64.32; c) 0.4953; d) 0.007647; e) 987.7.
3. Encontrar los productos siguientes: a) 2.5×3 ; b) 2.5×3.7 ; c) 1.6×5.0 ; d) 6×3.5 ; e) 4.7×5.8 .
4. Encontrar los productos que siguen: a) 27×3 ; b) 3.4×2.1 ; c) 2.3×2.9 ; d) 5.6×3.4 ; e) 4.3×8.7 .
5. Encontrar los siguientes productos: a) 3×26.4 ; b) 28×35 ; c) 29×17 ; d) 13.5×6 ; e) 17.2×21.6 .
6. Encontrar los productos siguientes: a) 2.5×17 ; b) 32×1.7 ; c) 19×14 ; d) 26.2×1.75 ; e) 23.2×9.4 .
7. Encontrar los cocientes que siguen: a) $6/5$; b) $25/4$; c) $38/7$; d) $64/3$; e) $72/2.7$.
8. Encontrar los siguientes cocientes: a) $7/2$; b) $32/5$; c) $56/4.2$; d) $26/3.4$; e) $8.5/4.6$.
9. Encontrar los cocientes siguientes: a) $35/6.2$; b) $67/5.9$; c) $325/28$; d) $420/270$; e) $675/780$.

INDICE ALFABETICO

- Aberración cromática, 211
 esférica, 211
 Absorción selectiva de la luz, 224
 Acción y reacción, fuerzas de, 27
 Aceleración, 18
 centrípeta, 66
 debida a la gravedad, 32
 definición, 18
 uniforme, definición, 18
 Acelerador atómico, 354
 lineal, 360
 Aceleradores de alta energía, 362
 Acomodación del ojo, 212
 Acumulador, 250
 Adhesión, 103
 Agua, ondas de, 162
 reloj de, 13
 Aire líquido, 154
 Aisladores eléctricos, 241
 Ala del avión, fuerza elevadora del, 126
 Alvarez, Luis, 402
 Ampere, A. M., biografía, 247
 definición, 247
 Amplitud de vibraciones, 159
 Anderson, C. D., 348
 Aneroides barómetro, 112
 Angulo de desviación en prismas, 195
 de elevación, proyectiles, 34
 Antinodos en ondas estacionarias, 163
 Antipartículas, 398
 Antiprotón, 401
 Apogeo, 73
 Aristóteles, biografía, 30
 Arquímedes, principio de, 102
 Arrastre del éter, 229
 Astigmatismo, 211
 Aston, F. W., biografía, 294
 espectrógrafo de masas, 294
 Atmósfera terrestre, 109
 Atómica, estructura de Bohr-Stoner, 304
 masa, 338
 modelo de onda, 309
 pila, 394
 Atómicas, fuerzas, 86
 ondas, 308
 Atómico número, 83
 peso, 296, 83
 Atomo, 83
 de Thomson, 301
 estructura, 301
 Atomos excitados, 304
 normales, 304
 Bar, unidad de presión, 115
 Barógrafo, 113
 Barómetro, aneroides, 112
 de mercurio, 111
 Baryón, 399
 Batería de vehículo, 251
 Baterías, 248
 Becquerel, A. H., biografía, 324
 Bernoulli, principio de, 123, 183
 Betatrón, acelerador de partículas, 360
 Bevatrón, Bev, 362
 Binoculares, prismáticos, 214
 Bohr, Niels, biografía, 302
 Bote de vela, fuerzas en el, 45
 Botellas termos, 145
 Brobeck, W. M., 363
 Brújula magnética, 260, 265
 B.t.u. definición, 139
 Caballo de potencia, definición, 54
 Caída de los cuerpos, 30
 libre, 31, 32
 Calcita, estructura cristalina, 89
 propiedades ópticas, 224
 Calor específico, tabla de, 139
 por corrientes eléctricas, 269
 transmisión del, 140
 Caloría, definición, 138
 Cámara fotográfica, principios, 211
 de burbujas, 400
 fotos, 334

de niebla, fotos, 346
de Wilson, 327, 346
Cambio de estado, 140
Campanas, vibración de, 188
Campo eléctrico, 243
uniforme, 244
magnético uniforme, 273
Campos magnéticos, 263
Cantidad de movimiento angular, 68
conservación de la, 58
Capacidad térmica, definición, 139
tabla, 139
Capas electrónicas, 305
Capilaridad, 106
Cápsula espacial, 75
Carga de rozamiento, definición, 121
electrónica, 286
Celda, húmeda, 250
seca, 250
voltaica, 248
Centelleos, contador de, 370
Centrífuga, fuerza, 65
Centro de gravedad, 47
de masa, 46
Centígrado, escala de temperaturas, 129
Centímetro, definición, 11
Centrípeto, fuerza, 64
Cerenkov, contador, 371
radiación, 371
Ciclo de carbono en el Sol, 397
del protón, energía solar, 397
Ciclotrón, Lawrence, 356
principios del, 356
Cielo azul, 225
Cinématica, definición, 52
Coeficiente de expansión térmica, 132
de restitución, 96
Cohesión, 103
Color, 201
metálico, 202
mezcla de pinturas, 205
Colores, adición de, 203
aditivos primarios, 203
aditivos secundarios, 204
complementarios, 6, 204
espectro de, 203
método sustractivo de, 204
mezclado de, 203
sustractivos primarios, 203
triángulo de, 203
Componentes, de una fuerza, 44
Compuesto, 83
Condiciones de equilibrio, 42

Conducción eléctrica, 241
térmica, 140
Conductividades térmicas, tablas, 142
Conductores y no conductores eléctricos, tablas, 241
Conservación de cantidad de movimiento angular, 68
Constante de gravitación, 32, 37
de Planck, 321
Contador geiger, 345
Convección térmica, 142
Copos de nieve, estructura, 89
Corriente alterna, generador, 276
de electrones, 252
de Eddy, 278
eléctrica, 247
eléctrica, calorífico de la, 269
efecto magnético de la, 270
efecto mecánico de la, 272
Coulomb, ley de electrostática, 242
Crane, H. R., 363
Cristales de cuarzo, 89
difracción, 318
estructura de la materia, 88
Cromaticidad, diagrama de color, 205
Crookes, Sir William, biografía, 281
Culombio, unidad de carga, 243
Curie, Irene, biografía, 366
Maria, biografía, 324
Pierre, biografía, 324
Curva de desintegración, 329
Curvatura de campo, óptica, 211
Chadwick, J., 336
Chubascos de rayos cósmicos, 350

Darrow, K. K., 343
Deformación unitaria, definición, 94
Densidad, definición, 101
del aire, 110
tabla, 101
Descarga luminosa, 281
Desintegración de deuterones, 366
espontánea, 328
múltiple, 366
Dewar, frasco, 146
Sir James, biografía, 154
Diagramas de Laue, 317
Día Solar medio, 13
Difracción de rayos X, 317
Dilatación diferencial, 133
Dina, unidad de fuerza, 25
Dispersión de la luz, 225
nuclear, sección transversal, 392
Distancia focal, lentes, 208

Doble refracción, 223
ranura de Young, 219
Du Fay, Charles, 239

Ecuación de trabajo, 54
Efecto estroboscópico, 6
Einstein, Albert, biografía, 229
ecuación fotoeléctrica, 320
relación masa-energía, 234
Elástica, choque de átomos, 333
Elasticidad, límite de, 93
Elástico, impacto, 95
Electricidad en reposo, 237
estática, 237
Eléctrico motor, 274
Electroimán, 272
Electrón, giro del, 307
Electrónica, carga, 242
masa, 286
Electrones, acelerador de, 360
afinidad de los, 239
corriente, definición, 247
descubrimiento de, 281
ondas de, 307
pares de, 348
proyector de, 286
saltos de, en el átomo de Bohr, 304
Electroscopio de hojas de oro, 240
Elemento, 83
Elementos transuránicos, 385
Elipse, cómo dibujarlas, 72
Emulsiones fotográficas, 352
Energía cinética, 53
definición, 53
de rotación, 68
conservación de la, 56
definición, 53
de ligado, 375
de los procesos nucleares, 338
masa, ecuación de la, 338
potencial, 52
solar, 397
Enfriamiento por evaporación, 148
Equilibrio de fuerzas, 42
Ergio unidad de trabajo, 50
Escala centígrada de temperatura, 129
Kelvin de temperaturas, 130
Rankine de temperaturas, 130
Escalar, definición, 17
Espacio oscuro de Crookes, 281
de Faraday, 283
Espato de Islandia, estructuras cristalinas, 89
propiedades ópticas de, 224

Espectro de emisión, 298
de líneas de absorción, 300
de emisión, 299
infrarrojo, 299
ultravioleta, 299
Espectros de absorción, 300
de clasificación, 298
Espectrógrafo de masas, 290
Esquema Bohr-Stoner, 304
Estabilidad giroscópica, 70
Estacionarias, ondas, 162
Estado esferoidal, 104
gaseoso de la materia, 86
sólido de la materia, 83
Estiramiento, ley de Hooke, 92
Evaporación de líquidos, 148
Excentricidad de una elipse, 73
Experimento Cockcroft-Walton, 354
del cazador y el mono, 35
Michelson-Morley, 229

Factor de reproducción, reacción en cadena, 392
Factores de conversión de longitud, 12
Fahrenheit, escala de temperaturas, 129
Faraday, Michael, biografía, 275
Fatiga del ojo, 5
Ferromagnetismo, 267
Figuras de arena, de Chladni, 187
equivocas, ilusiones ópticas, 4
Física, definición, 1
Fisión, energía de, 385
fragmentos de, 384
sección transversal, 391
proceso de, 382
Fluidos en movimiento, 119
Flujo por tuberías, 119
Fracción de empacado, núcleo, 377
Franjas de interferencia, 219
Franklin, Benjamin, biografía, 239
Frecuencia, definición, 159
de pulsación, definición, 173
fundamental, definición, 179
Frecuencias armónicas de las cuerdas de piano, tabla, 180
de una corneta, tabla, 184
Friederich, W., 316
Fotoeléctrica, celda, 319
Fotoeléctrico, efecto, 319
Fotografías de rayos X, 314
Fotones, rayos X, 318
Fuerza centrífuga, 65
centrípeto, 64, 66
Fuerzas de composición, 41, 44
descomposición, 44

diagrama de, 40
ecuación de las, 25
interatómicas, 85
unión, de sólidos, 148
del núcleo, 148

Galileo, G., biografía, 30
Gases, 109
Géisers, 152
Generador eléctrico, 276
Gilbert Sir William, biografía, 237
Goldstein, descubrimiento de rayos positivos, 289
Gráficas alcance-energía de los protones, 340
Gramo, definición, 12
Gravedad, centro de, 47
Gravitación, ley de Newton de la, 78

Halo, óptica, 198
Helicidad de partículas nucleares, 404
negativa, 404
positiva, 404
Helio, líquido, 156
Hemisferios de Magdeburgo, 117
Hidrógeno, líquido, 155
Hielo, cristales de, 198
Hogar, propiedades térmicas, 146
Hooke, ley de, 92
Hooke, Robert, biografía, 93
Humedad absoluta, 150
relativa, 149
Huygens, Christian, biografía, 218

Ilusiones de color, 5
ópticas, 3
Imágenes, formación óptica de, 209
reales, 210
virtuales, 210
Imanes, 260
Impulso, ecuación, 62
Inclinación magnética, 265
Índice de refracción, 192
Índices de refracción, tabla, 197
Inercia, definición, 23
Ingravedad, vuelo espacial, 77
Interferómetro de Michelson, 221, 229
Interferencia, franjas ópticas de, 219, 221
sonora, 174
Instrumentos musicales de cuerda, 179
de viento, 181
de percusión, 185
Iones, definición, 249

Ionización de átomos, definición, 304
Isóbaros, descubrimiento de los, 295
Isótopos, 293

Joliot, F., biografía, 366
Julio, unidad de trabajo, 51

Kelvin, escala de temperaturas, 130
Kepler, John, biografía, 72
leyes de, 72
Kilogramo, definición, 12
Kirchhoff, leyes de electricidad, 256
Knipping, P., 316

Lámpara de pilas, 251
Lawrence, E. O., biografía, 356
Lente amplificadora, 210
Lentes, 207
Leptones, 398
Ley de Lenz, 278
Ohm, 253
Snell, 194
Libra, unidad de fuerza, 26
Línea agónica de la Tierra, 265
isogónica terrestre, 265
Líneas magnéticas de fuerza, 263
Líquidos, 99
estado de la materia, 87
dilatación térmica de los, 135
presión de los, 100
Longitud de onda, definición, 164
medición de la, 176, 219
Lorentz-Fitzgerald, contracción de, 231
H. A., biografía, 231
Luna, distancia a la, 37
Luz, 190
difracción, 217
dispersión, 195
interferencia, 218, 221
polarización, 223
refracción, 192
velocidad de la, 192

Magnética, declinación, 265
Magnetismo, 260
Magnetización, 266
Mapa climatológico, 115
Marimba, instrumento musical, 185
Masa, centro de, 46
crítica, 392
definición, 24

energía, ecuación de, 234
espectrógrafo, 290
número de, 377
relación con la energía, 337
y peso, 49
Masas y pesos específicos de gases, tabla, 111
Mecánica newtoniana, 233
Media vida, período de, definición, 329
radiactividad, 329
Medición, métodos objetivos, 1
subjettivos, 1
Mercurio, barómetro de, 111
Mesones, descubrimiento de, 351
producción de, 351
transformación (degradación), 352
 π , rayos cósmicos, 351
Métodos subjettivos, 1
Metro, definición, 11
Métricas, sistemas de unidades, 10
Mezcla de colores, 203
Microscopio electrónico, fotos, 90
Millhar, unidad de presión, 115
Milímetro, definición, 11
Miller, D. C., 230
Millikan, experimento de la gota de aceite, 284
Robert A., biografía, 284
experimento de la gota de aceite, 284
MKS, sistema de unidades, 26
Modelo de pozo para núcleos, 378
Molecular, peso, 85
teoría del ferromagnetismo, 267
Moléculas, definición, 84
diatómicas, 84
monoatómicas, 84
poliatómicas, 84
triatómicas, 84
Movimiento armónico, 159
simple, 159
browniano, 87
circular, 64
Música, instrumentos de cuerda, 179

Neutrón, desintegración por, 370
modelo nuclear de desintegración por, 381
Neutrones lentos, desintegraciones, 370
rápidos, sección transversal, 391
Newton, ley de la gravitación de, 36
primera ley del movimiento de, 23
segunda ley del movimiento de, 25
Sir, Isaac, biografía, 23
tercera ley del movimiento de, 27
unidad de fuerza, 25

Newtoniana, constante de gravitación, 37
Nodos, ondas estacionarias, 163
Notas de pulsación, sonido, 173
Nuclear, descubrimiento de la desintegración, 335
energía, de ligado, 375
explosión, 390
modelo de Bohr, 379
reactor, 393
de energía, 394
sección transversal, 391
spin, 381
Números cuánticos, 305

Oersted, Hans Christian, biografía, 270
Ohm, George S., biografía, 253
Oído humano, 170
interno, 171
medio, 171
Ojo, descripción, 2
retina, 2
Ollas de presión, 151
Onda, ecuación de la, 164
antinodos de la, 164
de agua, 162
de rayos X, 316
longitudinal, 162
Ondas de Broglie, 307
tabla de longitudes de, 307
en columnas de aire, 182
en cuerdas de piano, 180
estacionarias, 162
vibración de resortes, 163
nodos en las, 164
refracción del sonido, 169
transversales, 162
tren de, definición, 161
Onnes, Kammerlingh, 156
Ortodoncia, 95

Paridad, 403
Partículas alfa, α , alcance, 329
elementales, 398
extrañas, 399
kappa, κ , 400
lambda, λ , 400
sigma, σ , 400
Pascal, Blas, biografía, 112
Películas polarizadas, 225
Péndulo simple, 57
Penetración de rayos cósmicos, 345
Perigeo, definición, 73
Período del movimiento armónico, 145

perspectiva, líneas de, 4
 peso, definición, 101
 específico, definición, 102
 y masa, 49
 Piedra imán, 260
 Pila húmeda, 250
 seca, 250
 Placas vibrantes, 186
 Planetas, masa de tablas, 74
 Polarización de la luz, 223
 Polígono de fuerzas, 41
 Polos magnéticos, 261
 Positiva, nula y negativa, 52
 Positivos, iones, definición, 249
 rayos, 289
 Positrones, 368
 Potencia, 54
 definición, 54
 Potencial, barrera de núcleo, 377, 379
 eléctrico, 244
 energía, 52
 Pozo de gravitacional; 78
 de nuclear, 379
 modelo para gravitación, 78
Powell, W., 350
 Presión atmosférica normal, 109, 115
 de vapor, 150
 definición, 99
 Prismas, binoculares, 214
 desviación mínima en, 195
 dispersión en, 195
 refracción por, 194
 Protones, desintegración por, 366
 proyectiles, 34
 altura máxima, 34
 Pulgada, definición, 11
 Pulsación, sonido, 173
 Punto ciego, 3
 del ojo, 3
 de ebullición, tabla, 154
 principios del, 151
 de ruptura, 93

Radiactividad, descubrimiento, 324
 inducida, 366
 Radioautógrafos (auto-radiografías), 372
 Radio del núcleo, 390
 Radiómetro de Crookes, 144
 Rankie, escala de temperaturas, 129
 Rapidez, definición, 16
 Rayos α , descubrimiento, 325
 Becquerel, 324
 β , descubrimiento, 325
 canal, 289
 catódicos, 283

cósmicos, 343
 primarios, 347
 secundarios, 347
 gamma, γ , 325
 Rayos X, 312
 aplicación práctica, 315
 difracción de, 317
 origen de los, 318
 poder de ionización, 315
 tubos de, 312
 Reacción en cadena, 389
 y acción, fuerzas, 27
 Reacciones típicas, 365
 Reactores nucleares, 393
 Rebote de esferas, 96
 Reflexión de la luz, leyes de la, 190
 del sonido, 170
 Refracción de la luz, 223
 de ondas sonoras, 170
 en el prisma, 194
 índice de, definición, 192
 Regla de la mano izquierda, 211
 Relatividad, teoría especial de la, 231
 teoría general de la, 231
 Relativista longitud, 232
 masa, 233
 Reloj del sol, 13
 Resistencia eléctrica, definición, 253
 Resistencias, en el paralelo, 255
 en serie, 254
 Respiración, proceso de la, 116
 Restitución, definición, 96
 Retina del ojo, 2
 Reversibilidad de los rayos luminosos, 194
 Rojo atardecer, 226
 Rotación en torno al centro de masa, 46
 energía cinética de, 68
Röntgen, W. K., biografía, 312
 Rozamiento, pérdida de carga por, 121
Rutherford, Lord Ernest, biografía, 324

Satélite, velocidad de escape, 78
 Satélites en el espacio, 77
 Sección transversal en Barns para U-235 pu-
 ro, tabla de, 392
 geométrica, núcleo, 390
 nuclear tabla de, 391
 Secundario, arcoiris, 197
 Secundarios electrones, 322
 emisión de electrones, 322
 Segundo sideral, definición, 14
 Semieje mayor de la elipse, 73
 menor de la elipse, 73
 Series radiactivas, 329

Shepard, Alan, vuelo espacial, 74
 Sistema de unidades de ingeniería, 10
 inglés de unidades, 10
 térmicas, 139
 Slug, unidad de masa, 26
Snell, W., biografía, 194
 Sodio, cloruro, cristal, 89
 espectro del, 301
 estructura atómica, 306
 radiactivo, 367
 Sol, distancia al, 37
 energía del, 397
 masa del, 37
 Solenoide magnético, 271
 Sólidos, dilatación térmica, 131
 Sonido, 167
 armónico, 179
 frecuencia de pulsación del, 173
 interferencia del, 174
 instrumentos de viento, 181
 musical, 179
 notas de pulsación, 173
 remolinos en un tubo, 184
 resonancia del, 173
 vibraciones simpáticas, 173
 sobretonos del, 179
 tono del, 169
 transmisión del, 167
 velocidad del, 168
 tabla, 168
 Sonidos armónicos, 179
 Spin del electrón, 307
 isotópico, 399
 nuclear, 404
Stranathan, J. D., 331

Tabla de conversión de rapidez y velocidad, 18
 Tablas de conversión de velocidades, 18
 de densidades y masas específicas, 101
 de dilatación térmica, 132
 de fórmulas de proyectiles, 35
 de longitud de onda de De Broglie, 307
 de longitud de ondas de luz, 220
 de neutrones y protones, 337
 de series radiactivas, 330
 de temperatura de ebullición y altitud, 154
 de tensión superficial, 106
 de unidades de longitud, 12
 periódica de los elementos, 292
 Tanque de ondas, 174
 Telescopio astronómico, 213
 poder de amplificación, 213
 Temperatura absoluta, 129

definición, 128
 escalas, 128
 Tensión superficial, 104
 tabla de, 106
 Teoría de Bohr, 302
 ondulatoria de la luz, 217
 Térmica conducción, 140
 conductividad, tabla de, 142
 convección, 142
 dilatación, 131
 radiación, 144
 Termómetro de Galileo, 128
 de mercurio, 129
 Termómetros, 128
 eléctricos, 130
 Termopar, principios del, 130
 Termopila, 131
Thomson, Benjamin, biografía, 138
Thomson, Sir J. J., biografía, 287
 Tierra, campo magnético de la, 264
 masa de la, 76
 Tonos de bordes vibrantes, 184
Torricelli, Evangelista, biografía, 120
 teorema, 121
 Torsión, 95
 Trabajo, definición, 50
 Transmutación, de elementos, 364
 espontánea, 328
 Triángulo, método del, composición de vec-
 tores, 40, 41
 Trompo, 70
 Tubo fotomultiplicador, 321
 Geiger-Mueller, 345
 Geissler de descarga, 281
 Tubos de órgano, 185
 Tycho Brahe, 72

Unidades, atómicas de masa, 296
 derivadas, 10
 de medición, 10
 fundamentales, 10
 métricas, 14
 Unipotencia, unidad, 54
 Van de Graaff, generador de, 359
 Vapor de agua en aire saturado, tabla, 150
 Vatio definición, 53
 Vectores, adición o composición, 40
 definición, 17
 Velocidad angular, 64
 definición, 16
 de la luz materia en movimiento, 222
 del sonido, 168
 instantánea, 64

orbital de satélites, 78
promedio, 16
relativista, 232
entana trapezoidal, 8
ibración de instrumentos de cuerda, 180
 de viento, 181
 de triángulos, 185
 de varillas, 185
iscosidad de gases, 122
de líquidos, 122
'eta, Alessandro, biografía, 248
'on Guericke, Otto, biografía, 117

Von Laue, Max, biografía, 316
Vuelos espaciales, 74

White, H. E., 198
Wien, W., 289
Wu, C. S., 384

Xilófono, 185

Young, R. W., 180
Yukawa, teoría del mesón, 352

Programas Educativos, S.A. de C.V.
Calz. de Chabacano No. 65, Local A
Col. Asturias, C.P. 06850, México, D.F.
Tiro: 2,000 ejemplares
Fecha: Octubre de 1997
Empresa Certificada por el
Instituto Mexicano de Normalización
y Certificación A. C., bajo la Norma
ISO-9002: 1994/NMX-CC-004: 1995
con el No. de Registro RSC-048